

UNTERSUCHUNGEN VON KONGENITALEN
FARBSINNGESTÖRTE MITTELS EINES
SPEZIELL ZUSAMMENGESETZTEN
POLYCHROMATISCHEN REIZLICHTES

Wilhelm Joachim Pohl

Jahr

1985

*Diss
München*



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554825_0069

Aus der Augenklinik der Universität München

Direktor: Prof. Dr. med. O.-E. Lund

Untersuchungen von kongenital Farbsinngestörten mittels
eines speziell zusammengesetzten polychromatischen
Reizlichtes

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
an der Ludwig Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Wilhelm Joachim Pohl

aus

Breslau

Jahr

1985

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. med. O.-E. Lund

Mitberichterstatter:

Dekan: Prof. Dr. med. W. Spann

Tag der mündlichen Prüfung: 21.11.35

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
<u>1.0. Zusammenfassung</u>	3
<u>2.0. Einführung</u>	5
2.1. Bedeutung der Farbsinnprüfung	5
2.2. Problemstellung	7
2.3. Erläuterung bisher angewandter Tests zur Farbsinnprüfung	11
2.4. Eine neue Untersuchungsmethode zur Farb- sinnprüfung mittels spektral zusammen- gesetzter Reize	24
2.4.1. FIS als objektive Untersuchungsmethode zur Farbsinnprüfung	25
2.4.2. FIS als subjektive Methode zur Farb- sinnprüfung	33
2.4.3. Experimentelles Vorgehen	35
<u>3.0. Versuchsaufbau und Patientengut</u>	38
3.1. Experimenteller Aufbau	38
3.1.1. Der optische Aufbau	38

	Seite
3.1.2. Der mechanisch-elektronische Aufbau	45
3.1.3. Der Mikrocomputer	47
3.2. Patientengut	51
3.3. Versuchsdurchführung	53
3.3.1. Allgemeine Voruntersuchungen	53
3.3.2. Untersuchungen mit dem Multiplexen Spektral-Stimulator (MSS-Untersuchung)	56
<u>4.0. Ergebnisse</u>	58
4.1. Ergebnisse der allgemeinen Voruntersuchungen	59
4.2. Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Multiplexen Spektral-Stimulator	67
4.2.1. Die Erläuterung der Auswertungs-Methoden anhand von Einzel-Resultaten und die verwendeten Arten der Ergebnis-Darstellung	68
4.2.2. Die Auswertung und Darstellung der mit dem Spektral-Modulator durchgeführten Untersuchungen	75
<u>5.0. Diskussion</u>	98
<u>6.0. Literatur</u>	114

1.0. Zusammenfassung

Mit einem neuwertigen Testverfahren wurden Untersuchungen an kongenital Farbsinngestörten durchgeführt. Es wurde ein Farbtest angewandt, bei dem als Stimulus ein polychromatisch zusammengesetzter Reiz diente. Erzeugt wurde dieser Farbreiz durch einen besonderen apparativen Aufbau. Dabei passierte ein durch ein Verlauffilter spektral zerlegtes Licht einer weißen Lichtquelle eine speziell mit lichtdurchlässigen und undurchlässigen Sektoren beschichtete drehbare Scheibe. Das von dieser Sektorenscheibe durchgelassene Licht wurde gesammelt und in einem Lichtleiter zu einer kleinen Ulbrichtkugel geführt. Das in der Ulbrichtkugel gestreute Licht diente als homogen ausgeleuchteter Testfleck.

Durch diese Apparatur erhielt man einen polychromatischen Testreiz, bei dem sowohl die Farbhelligkeit, die Farbsättigung als auch der Farbton in Abhängigkeit des Drehwinkels der Scheibe verändert werden konnte. Durch diesen Versuchsaufbau konnten somit verschiedene Punkte des Farbraumes eingestellt werden.

Diese Farbreize wurden einem nach geltenden Regeln kongenital farbsinngestörten Patientengut zur subjektiven Farbbeurteilung angeboten. Untersucht wurde, ob es relevante Winkelstellungen der Sektorenscheibe gibt

(entspricht definierten polychromatischen Zusammensetzungen des Reizlichtes), die bei bestimmten Farbsinn-Störungen zu typischen Falschaussagen führen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß durch diesen Farbtest mit dem als "Multiplexen Spektral-Stimulator" (MSS) bezeichneten Aufbau die Farbfehlsichtigen erfaßt und prinzipiell typspezifisch klassifiziert werden können. Die bisher gewonnenen Ergebnisse werden vorgestellt und mögliche Vorgehensweisen bei der Anwendung des MSS-Tests diskutiert.

2.0. Einführung

2.1. Bedeutung der Farbsinnprüfung

Die Prüfung des Farbensehens spielt bei der Untersuchung der retinalen Funktionen eine wichtige Rolle, da intaktes Farbsehen die Höchstleistung des menschlichen visuellen Systems darstellt. Für ein normal funktionierendes Farbsehen sind unterschiedliche Photorezeptoren nötig, die mit mannigfaltigen komplexen nachgeschalteten Neuronen und ihren Querverbindungen in sinnvoll abgestimmter Weise zusammenwirken. Störungen des Farbsehens bilden oft erste und einzige Symptome für ein beginnendes pathologisches Geschehen. Spezifische Funktionsstörungen des Farbsehens erlauben daher oft Rückschlüsse auf Funktionseinschränkungen der neuronalen Interaktion und somit auf die hierfür verantwortlichen pathophysiologischen Mechanismen. Von daher ist es verständlich, daß in der klinischen Diagnosefindung die Prüfung des Farbsinns für den Augenarzt ein unverzichtbares Verfahren darstellt. Während die Ergebnisse der Untersuchungen an kongenital Farbsinngestörten viel zum Verständnis der Farbwahrnehmung und Farbverarbeitung des menschlichen

visuellen Systems beigetragen haben, sind es vor allem die erworbenen Farbsinnstörungen, die den praktisch tätigen Augenarzt interessieren, um rechtzeitig ein pathologisches Geschehen zu erkennen. Hierzu ist es notwendig, daß man über entsprechend empfindliche Tests zur Prüfung des Farbensehens verfügt, die es erlauben, schon kleinste Störungen zu erkennen, zu deuten und wenn möglich eine entsprechende Therapie einzuleiten.

2.2. Problemstellung

Es gibt verschiedene Methoden, die Farbsinnstörungen sowohl qualitativ als auch quantitativ zu erfassen. Grundsätzlich werden diese Verfahren in objektive und subjektive Methoden eingeteilt.

Die subjektiven, sogenannten "psychophysikalischen" Untersuchungsmethoden basieren auf dem qualitativen Urteil eines Beobachter-Kollektivs. Bei den objektiven Untersuchungsmethoden des Farbsinns dient eine elektrische Antwort (ERG, VEP) als Maß für eine Reaktion des visuellen Systems auf einen Farbreiz. Der Vorteil dieser Methode besteht eindeutig darin, daß man hier objektive, von der Aussage der Testperson unabhängige Ergebnisse erzielt. Der Nachteil liegt darin, daß bisher keine "brauchbaren", d. h. sowohl vom apparativen als auch zeitlichen Aufwand zu rechtfertigenden Verfahren existieren, die in der klinischen Routinediagnostik eingesetzt werden könnten. Sie bleiben daher zunächst nur wenigen speziellen Instituten in der Grundlagenforschung vorbehalten. Im Gegensatz hierzu existieren viele sogenannte "subjektive Farb-Tests", die mit relativ geringem Zeitaufwand empfindliche Störungen im Farbensehen zu registrieren erlauben. Nachteilig jedoch ist der subjektive Charakter der Meßergebnisse. Der

klinisch interessierte Augenarzt wird daher bemüht sein, nach Methoden zu suchen, deren Einsatz ein Mehr an Information liefert, als dies mit bisherigen Verfahren der Fall ist, wobei objektive Methoden bevorzugt werden.

In Zusammenarbeit zwischen dem Zoologischen Institut und der Augenklinik der Universität München ist in den letzten Jahren eine Methode entwickelt und vorgestellt worden, die eine objektive Messung der spektralen Empfindlichkeitskurve sowohl auf der retinalen als auch auf der kortikalen Ebene erlaubt (1,20). Sie wird von den Autoren als die Fourier-Interferometrische Stimulation (FIS) bezeichnet. Die Vorteile dieses Verfahrens sind mannigfaltig (10,12), bestehen aber im wesentlichen darin, daß der Zeitaufwand für die Messungen relativ gering bleibt, was den klinischen Einsatz dieser Methode zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit beim Menschen möglich macht.

Der bei diesem Verfahren angewandte Stimulus kann auch für psychophysikalische Untersuchungen eingesetzt werden. Diese Tatsache bildet den Ausgangspunkt und die Grundlage der vorliegenden Arbeit. Wie in Kap. 2.1. erwähnt, bilden die kongenital Farbsinngestörten ein geeignetes Versuchskollektiv zum Studium von Farbverarbeitungsmechanismen des visuellen Systems oder auch zur Erprobung neuer Farbtests.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit war es notwendig:

1. Ein Patientenkollektiv von kongenital Farbsinn-gestörten zusammenzustellen und anhand der bisher bekannten und am häufigsten angewandten Verfahren (siehe Kap. 2.3.) genau zu klassifizieren,
2. Die so zusammengestellten Versuchsgruppen mit einem modifizierten subjektiven Test zu untersuchen, bei dem als Stimulus ein speziell zusammengesetzter polychromatischer Lichtreiz zur subjektiven Beurteilung dargeboten wird; ein prinzipiell ähnlicher Stimulus findet auch bei der Methode der Fourier-Interferometrischen Stimulation (FIS) Verwendung, die zur Ermittlung der spektralen Empfindlichkeit aus dem Elektroretinogramm dient (siehe oben).

Das angestrebte Ziel dieser Arbeit war es:

1. Ein nach einem bestimmten Schema exakt erfaßbares Patientenkollektiv an kongenital Farbsinn-gestörten für subjektive Farbtests und folgende FIS-Untersuchungen zusammenzustellen und
2. Die bei den subjektiven Untersuchungen mit dem FIS-ähnlichen spektral veränderlichen polychromatischen Test-Reiz an diesem Patientenkollektiv erhaltenen Ergebnisse den bisher angewandten Verfahren gegenüberzustellen und die Unterschiede herauszuarbeiten.

Weiterhin sollen die Ergebnisse der subjektiven Untersuchung mit dem spektral veränderlichen polychromatischen Testlicht eine Grundlage bilden für objektive spektrale Empfindlichkeitsmessungen am gleichen Patientenkollektiv mittels Fourier-Interferometrischer Stimulation. Der Vergleich der Resultate der subjektiven Untersuchungen mit den objektiven spektralen Empfindlichkeitskurven ist jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

2.3. Erläuterung bisher angewandter Tests zur Farbsinnprüfung

Zum besseren Verständnis der vorliegenden Fragestellung sollen an dieser Stelle die physiologischen Grundlagen der verwendeten Tests kurz erläutert werden.

In unserer Außenwelt existiert das Licht als elektromagnetische Strahlung unterschiedlicher Wellenlänge. Vom humanen visuellen System wird die Wellenlängenzusammensetzung des Lichtes in verschiedene Farbempfindungen umgesetzt. So werden Lichtquellen mit vorwiegend langwelligen Anteilen als "rot", die mit vorwiegend kurzwelligen Anteilen als "blau" bezeichnet. Betrachtet man Lichter nur einer Wellenlänge, oder solche, die nur aus einem schmalen Wellenlängenband bestehen, so kann daß human-visuelle System eine Farbempfindung zwischen 380-720 nm erfahren. Diesen Bereich bezeichnen wir als den sichtbaren spektralen Anteil des Lichtes (Abb. 2.3.1.).

Die Lichtaufnahme des visuellen Systems erfolgt durch die Netzhaut. Hier sind drei verschiedene Zapfentypen für das Farben- und Tagessehen verantwortlich, nämlich der

rotempfindliche-

gründempfindliche- Zapfen

blauempfindliche-

Weiter existieren Stäbchen, die für das Dämmerungssehen verantwortlich sind. Die alleinige Existenz der drei Zapfenmechanismen gewährleistet noch kein funktionell intaktes Farbsehen. Die Informationen, die die einzelnen Zapfenmechanismen empfangen, müssen noch weiter verrechnet werden, wobei ein Großteil dieser Verrechnung bereits auf der retinalen Ebene geschieht.

Young und Helmholtz entwickelten auf dem Boden des "Dreiermechanismus" (Rot-Grün-Blau) ihre Vorstellung über die Farbwahrnehmung, wobei hier offen blieb, wie die Gelbempfindung zustande kam. Daher entwickelte Hering ein Modell der Farbwahrnehmung, das einen "Vierermechanismus" zugrunde legte (siehe Abb. 2.3.2.):

rot - grün

gelb - blau

Erst von Kries faßte beide Vorstellungen in seiner "Zonentheorie" zusammen, die besagt, daß in der Zone der Sehzellen der Dreiermechanismus verwirklicht ist. In der umfangreicheren postrezeptoralen Zone (teils retinal gelegen) wird die von den Rezeptoren einfallende Information so verrechnet, daß die vier farbigen Grundempfindungen rot, grün, gelb und blau zustande kommen. Dabei spielen die sogenannten Gegenfarbennuronen

(rot-grün und gelb-blau) eine wichtige Rolle, in denen die jeweiligen Signale von den entsprechend empfindlichen Rezeptorsystemen abgewogen werden. Es tritt die Farbempfindung ein, deren Wellenlänge im Signal jeweils überwiegt. Werden zwei Typen von Sehzellen in einem bestimmten Verhältnis erregt, so führt dies zu einem zusätzlichen qualitativ anderen Seheindruck. So wird der Farbeindruck "gelb" vermittelt, wenn man zwei Wellenlängen $\lambda_1=670\text{nm}$ (rot) und $\lambda_2=545\text{nm}$ (grün) mischt. Man bezeichnet diesem Vorgang als additive Farbmischung. Mischt man im entsprechenden Verhältnis blau hinzu (Erregung des Blaurezeptors), so kann eine Weißempfindung entstehen (Abb. 2.3.3.).

Diese additiven Farbmischung ist nicht gleichzusetzen der Mischung von "Pigmentfarben" auf einer Palette. Diese Pigmentfarben absorbieren bevorzugt einen bestimmten Teil des Spektrums des einfallenden Lichtes, d. h. sie "subtrahieren" einen Teil des eingestrahltten Lichtes. Fügt man zwei solche Pigmente zusammen, so nimmt die Absorption zu; man spricht von der sogenannten "subtraktiven Farbmischung". Gibt man weitere Pigmente hinzu, so kann der absorbierende Anteil überwiegen und zwar so stark, daß die Empfindung "dunkelbraun" bis "schwarz" entsteht (Abb. 2.3.3.).

Beide Prinzipien (farbige Lichter bzw. Pigmentfarben)

dienen als Grundlage zur Entwicklung von Tests zur Untersuchung von Farbsinnstörungen. Die in der Regel in der klinischen Diagnostik und auch in dieser Arbeit angewandten Verfahren sind im folgenden beschrieben:

Das Nagel-Anomaloskop

Zur Klassifizierung von Rot-Grün-Störungen wird ein Spektralapparat benutzt, der von dem Physiologen Nagel entwickelt und nach ihm benannt worden ist. Hier liegt als Prinzip die Bewertung einer additiven Mischung aus Rot und Grün zugrunde, die zur Wahrnehmung "gelb" führt. Farbnormale Beobachter sehen die additive Mischung aus Rot und Grün genauso als gelbe Farbe wie ein zum Vergleich projiziertes Gelb-Standard-Licht. Beobachter mit einem nicht vollwertigen "rotempfindlichen" Sehfarbstoff benötigen entsprechend mehr Rot im Mischlicht, um die Standard-Gelbempfindung zu erreichen. Diese Patienten werden als "protanomal" bezeichnet. Entsprechendes gilt für einen Probanden mit einem nicht vollwertigen "grünempfindlichen" Sehfarbstoff. Dieser benötigt folglich mehr Grün im Mischlicht, um den Gelbstandard zu erreichen. Er wird als "deutanomal" bezeichnet. Ist bei den jeweiligen Farbanomalen der Sehfarbstoff extrem stark vermindert oder nicht

vorhanden, so spricht man von "Protanopie" bzw. "Deutanopie".

Die Untersuchung mit dem Nagelschen Anomaloskop geschieht nach einem festgelegten Schema. Dabei werden die Mischverhältnisse von roten und grünen Spektralanteilen gegen einen vorgegebenen, in der Helligkeit variablen Gelb-Standard für diejenigen Wertepaare aufgetragen, bei denen Mischung und Standard den gleichen Farb- und Helligkeits-Eindruck beim Probanden erzeugen. Die verschiedenen Farbsinngestörten verhalten sich in typischer Weise und können somit exakt klassifiziert werden (Abb. 2.3.4., siehe auch Abb. 3.3.3.1.).

Nicht erfaßt werden mit dieser Untersuchung die Patienten mit Blausinn-Störung (Tritanopie).

Bezüglich technischer Details sowie einer ausführlichen Darstellung des Meßvorganges sei auf entsprechende Fachliteratur (z. B. 18,29) verwiesen.

Die Pigmentfarbentests

Eine "Farbe" läßt sich durch Farbton, Farbhelligkeit und Farbsättigung beschreiben. Ein einfaches Modell hierzu stellt der Munsellsche Farbenbaum dar (Abb. 2.3.5.), wobei der Farbton durch die Richtung des "Äste", die Helligkeit durch die Höhe des Astes am Stamm und die

Sättigung durch eine Ebene des Baumes beschrieben wird. Der Schnitt durch eine Ebene des Baumes liefert eine Fläche von Farben gleicher Helligkeit, wie sie modifiziert im Farbdreieck (DIN 5033) beschrieben sind (Abb. 2.3.6.). Dabei wird eine Farbe durch ihren Rotanteil (Abszisse) und ihren Grünanteil (Ordinate) sowie ihren Blauanteil bestimmt, der sich aus der Differenz zwischen 1 und der Summe von Grün- und Rotanteil ergibt. Gemeinsame Grundlage aller Pigmentfarbentests ist das Konzept der "Verwechslungslinien", deren Prinzip in Abb. 2.3.7.a-c erläutert ist.

Die von Normalsichtigen unterscheidbaren Farbtöne werden in einem Koordinatensystem geordnet. Dabei liegen die "sattesten" Farben, die Spektralfarben, die bei Einstrahlung von Licht einer einzigen Wellenlänge wahrgenommen werden, ganz außen. Mischt man andere Wellenlängen hinzu, so tritt Entsättigung des Farbeindrucks ein, bis ein Punkt maximaler Entsättigung erreicht wird, der sogenannte "Weißpunkt". Die verschiedenen Farbtafel-Tests sind nun so konstruiert, daß Pigmente verwendet werden, deren Farborte auf typischen Verwechslungslinien liegen.

Zu den in dieser Arbeit angewandten Pigmentfarben-Tests gehören die Tafeln nach Ishihara zur Erkennung von

Rot-Grün-Farbsinnstörungen sowie der TMC-Test zur Erfassung von Blausinn-Störungen (Abb. 2.3.8., 2.3.9.).

Dem desaturierten Panel D-15 Farbtest liegt die direkte Anwendung der Geometrie der Verwechslungslinien zugrunde (Abb. 2.3.7.d). Die Aufgabe der Versuchspersonen, die Farbsteine in der Reihenfolge der Farbähnlichkeit anzuordnen, führt dazu, daß der Protanope, Deutanope und Tritanope selbst seine jeweiligen Verwechslungslinien zur Darstellung bringt. Dazu wird die richtige Farbabfolge in kreisförmiger Anordnung durch fortlaufende Positionsnummern (1-15) bezeichnet. Die Verbindung dieser Positionen, deren Reihenfolge durch die wahrgenommene Farbähnlichkeit bestimmt wird, ergibt beim Probanden mit normalem Farbsinn einen Kreis. Beim Farbsinngestörten erhält man jedoch innerhalb der Kreisfläche Schnittlinien (Verwechslungslinien), aus deren Achsenlage sich auf die Art der Farbsinnstörung schließen läßt (siehe hierzu auch Abb. 3.3.1.1.).

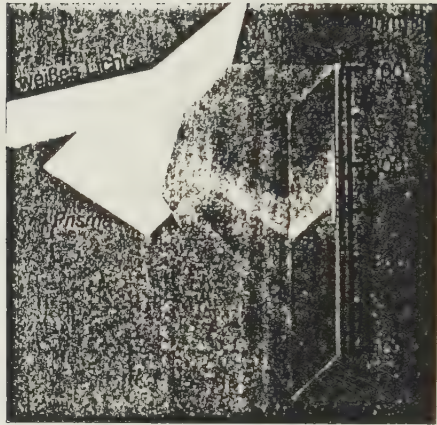


Abb. 2.3.1.: Spektrum des sichtbaren Lichtes (aus (22))

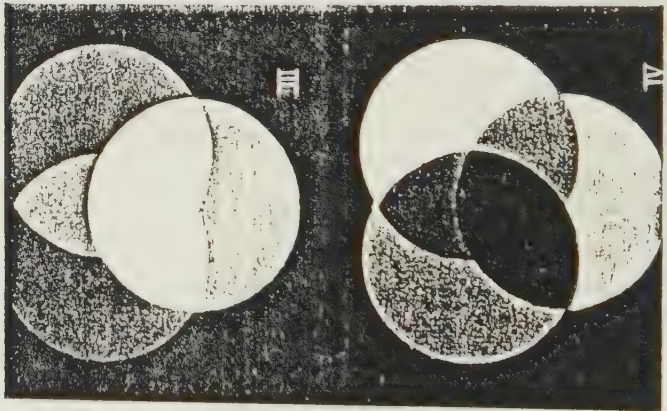


Abb. 2.3.3.: Additive (links) und subtraktive (rechts) Farbmischung (aus (5))

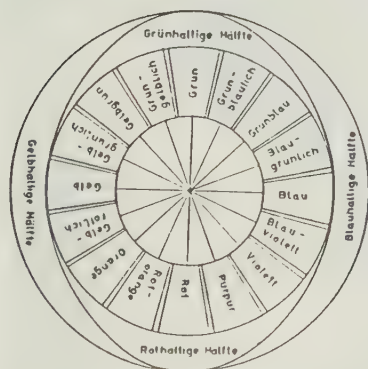
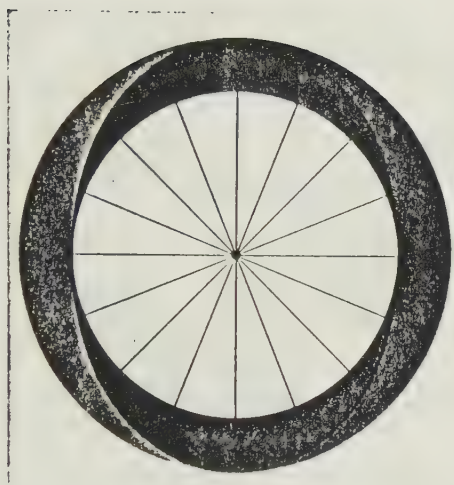


Abb. 2.3.2.: Der Farbkreis nach Hering (oben aus (15), unten aus (21))

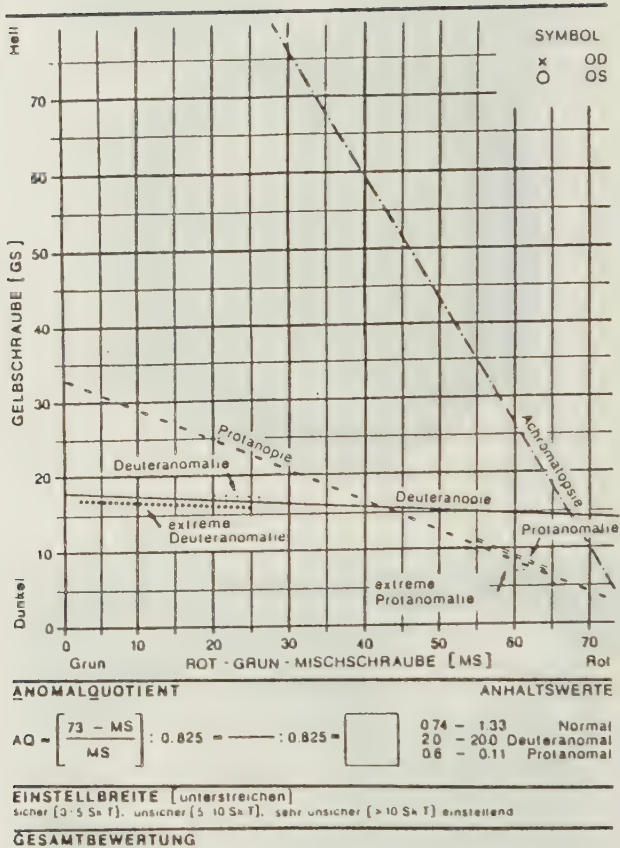


Abb. 2.3.4.: Protokollblatt zur Bewertung des Farbsinntests mit dem Nagel Anomaloskop; es sind die Linien bzw. Bereiche der Wertepaare eingezeichnet, bei denen die jeweiligen Farbsinnstörungen die beiden Testfelder als gleich hell und gleich farbig empfinden (aus (29))

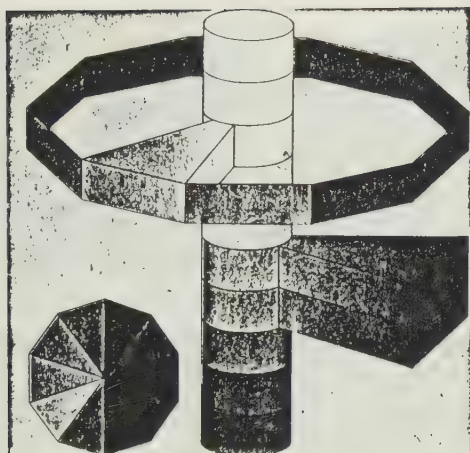


Abb. 2.3.5.: Der Munsellsche Farbbaum (aus (29))

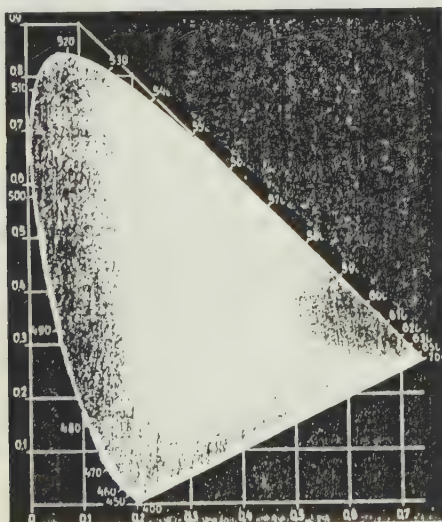


Abb. 2.3.6.: Das Farbdreieck nach DIN 5033 (aus (5))

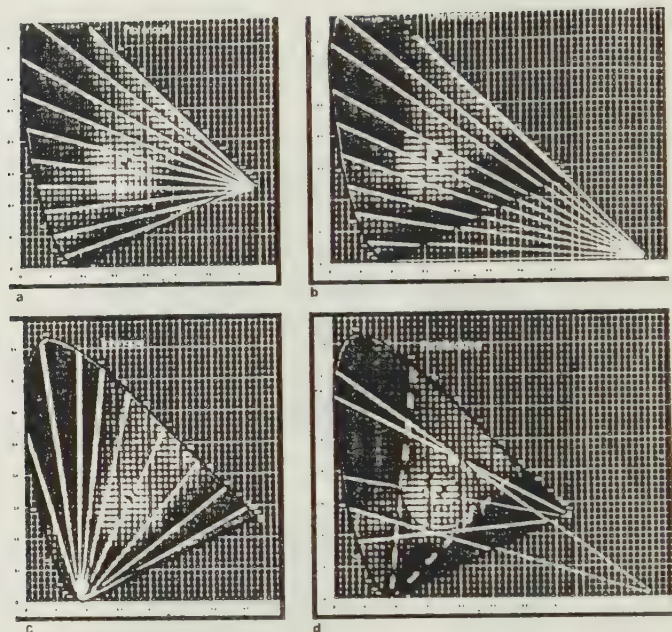


Abb. 2.3.7.a-d: Das Farbdreieck (nach DIN 5033), versehen mit Verwechslungsgeraden von Protanopen (a), Deuteranopen (b) und Tritanopen (c). Dichromaten verwechseln Farben nur entlang solcher Linien, die sich im jeweiligen Fehlpunkt schneiden. Orthogonal dazu liegende Farbpaare werden nicht verwechselt. Abb. d zeigt schematisch die Farborte der Farbproben des Farnsworth 100 Hue Tests (großer Kreis) und des Panel D-15 Tests (kleiner Kreis), zusammen mit Verwechslungsgeraden von Protanopen (durchgehende weiße Linie), Deuteranopen (gepunktete weiße Linie) und Tritanopen (gebrochene weiße Linie), die die Farbproben tangential berühren (aus (29))

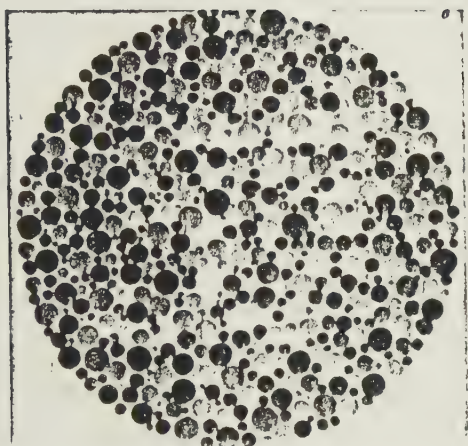


Abb. 2.3.8.: Beispiel für eine Ishihara-Tafel (aus (3))



Abb. 2.3.9.: Beispiel für den TMC-Test (aus (29))

2.4. Eine neue Untersuchungs-Methode zur Farbsinnprüfung mittels spektral zusammengesetzter Reize

In den letzten Jahren wurde eine neue Untersuchungsmethode vorgestellt (8,9,11), die neben anderen Anwendungen ein erfolgreiches Verfahren zur klinischen Diagnostik von Farbsinnstörungen zu werden verspricht. Die als Fourier-Interferometrische Stimulation (FIS) bezeichnete Methode wird in den nächsten Kapiteln vorgestellt. Sodann wird das in der vorliegenden Arbeit durchgeführte FIS-ähnliche experimentelle Vorgehen erläutert; die methodischen Abweichungen von der herkömmlichen FIS-Untersuchungsmethode werden begründet.

2.4.1. FIS als objektive Untersuchungsmethode zur Farbsinnprüfung

Die Methode der Fourier-Interferometrischen-Stimulation (FIS) wurde im Zeitraum von 1977 -1981 im Zoologischen Institut der Ludwig-Maximilians-Universität München von Gemperlein, Paul und Steiner entwickelt, und für Anwendungen am Menschen gemeinsam mit Adamczyk angepaßt. FIS stellt eine aktionsspektrometrische Methode dar zur elektrophysiologischen Bestimmung der Spektralreaktion von Lichtsinneszellen und wurde ursprünglich zur Untersuchung des Komplexauges von Insekten eingesetzt (19). Im Gegensatz zu den herkömmlichen Methoden zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit, die die Antworthöhe der Lichtsinneszellen auf monochromatische Rechteckreize bei unterschiedlichen Wellenlängen bestimmen, wird bei der Fourier-Interferometrischen Stimulation ein speziell zusammengesetztes Reizlicht verwendet. Dieser Stimulus und die dadurch bedingte Ermittlung der spektralen Reaktion sollen im nachfolgenden kurz vorgestellt werden:

Der FIS-Reiz enthält im Gegensatz zum rechteckförmigen monochromatischen Reizlicht alle Spektralkomponenten einer Reizlichtquelle gleichzeitig. Jeder monochromatische Anteil der Lichtquelle wird jedoch

zeitlich sinusförmig moduliert (Abb. 2.4.1.1.). Die Modulationsfrequenz ist dabei in eindeutiger Weise mit der Reizlichtwellenlänge korreliert (9). Dies bedeutet, daß z. B. das rote Reizlicht 4 Hell/Dunkel-Wechsel pro Sekunde aufweist, das blaue Reizlicht dagegen 8 Hell/Dunkel-Wechsel. Technisch wird diese wellenlängenabhängige Modulation durch ein Michelson-Interferometer mit kontinuierlich linear vorgetriebenem beweglichen Spiegel erreicht.

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Modulationsfrequenzen wird eine Schwebung der verschiedenen gleichzeitig angebotenen Reizlichter wahrgenommen. Diese Schwebung bezeichnet man als Interferogramm. Dem menschlichen Beobachter erscheint es als eine erst zunehmende, dann wieder abnehmende Veränderung in Intensität und Farbe des Reizes. In Abb. 2.4.1.2. ist die Intensitätsschwankung dargestellt. Gleichzeitig sind die Farben angegeben, die ein menschlicher Beobachter wahrnimmt. Zu beachten ist, daß diese Farbeindrücke keine spektral reinen, sondern polychromatische Lichtreize als Ursache haben. Dies ist in Abb. 2.4.1.3. verdeutlicht, in der das Reizlichtspektrum einer als spektral glatt angenommenen Lichtquelle für drei Interferogramm-Positionen aufgezeichnet ist.

Wird ein lichtempfindliches System, z. B. ein menschliches Auge, mit dem vorstehend beschriebenen Stimulus gereizt und eine Antwort elektrophysiologisch abgeleitet (siehe Abb. 2.4.1.4.), so enthält diese Summenantwort nur diejenigen Modulationen, deren Reizlichtwellenlängen vom zu untersuchenden System empfangen werden. Nimmt ein Sehsystem z. B. kein mit 4 Hz moduliertes rotes Reizlicht wahr, so liefert es auch in der Summenantwort keine 4 Hz-Komponente. Durch eine Frequenzanalyse ist es somit möglich, die Antwortamplituden der verschiedenen Reizlichtfrequenzen zu bestimmen. Da den Reizfrequenzen eindeutig Reizlicht-Wellenlängen zugeordnet sind, ist deshalb auch die spektral-abhängige Reaktion des Licht-empfindlichen Systems ermittelt (Abb. 2.4.1.5.).

Für die Frequenzanalyse wird die Fourier-Transformation durchgeführt. Dieses mathematische Verfahren zerlegt ein beliebiges Signal in eine Summe von einzelnen sinusförmigen Anteilen unterschiedlicher Frequenz und Amplitude.

In der vorliegenden Arbeit wird nicht näher auf die FIS-Methode eingegangen. Das gesamte Verfahren und seine technische Realisation sind in (19,24) dargestellt.

Wie weiter oben beschrieben, wurde die FIS-Methode zuerst zur Untersuchung der spektralen Empfindlichkeit von

Insektenaugen eingesetzt. Unter anderem wurden die blaue Schmeißfliege (19) und verschiedene Schmetterlingsarten (23,24) ausführlich untersucht. In diesen Messungen konnten überzeugend die Vorteile dieser Methode gegenüber bisher angewandten Verfahren dargelegt werden.

Schon seit 1980 wurden parallel in Zusammenarbeit mit der Universitäts-Augenklinik München Anstrengungen unternommen, die FIS-Methode auch zur Untersuchung am Menschen anzupassen. Dazu wurde das menschliche Auge mit dem FIS-Stimulus gereizt (siehe experimenteller Aufbau, Abb. 2.4.1.4.) und das Elektoretinogramm mit einer haftschalenähnlichen Elektrode (ERG-Jet von Nicolet) abgeleitet (Abb. 2.4.1.6.).

Erste Ergebnisse dieser Untersuchungen, die skotopische spektrale Human-Empfindlichkeit, wurden 1980 vorgestellt (8). Im weiteren Verlauf der Experimente konnten Ergebnisse erzielt werden, die zeigten, daß die FIS-Methode in der klinischen Augendiagnostik sinnvoll zur Prüfung der retino-kortikalen Funktionen eingesetzt werden kann.

In letzter Zeit wurden Techniken der Systemanalyse eingeführt, die es erlauben, die mit der FIS-Methode ermittelten Systemantworten in die Antworten von Einzelsystemen zu zerlegen (24,25). Erste Ergebnisse dieser Auswertung lassen vermuten, daß hier ein äußerst

effizientes Verfahren gefunden wurde, welches schon geringe pathologische Veränderungen im Retinabereich erkennen läßt, die durch das herkömmlich ermittelte ERG des Menschen nicht sichtbar gemacht werden können.

All den vorstehend genannten Experimenten ist gemeinsam, daß sie auf einer objektiv ermittelbaren elektrophysiologischen Ableitung beruhen. Das nächste Kapitel soll jedoch zeigen, daß sich die FIS-Methode auch für psychophysikalische Untersuchungen einsetzen läßt.

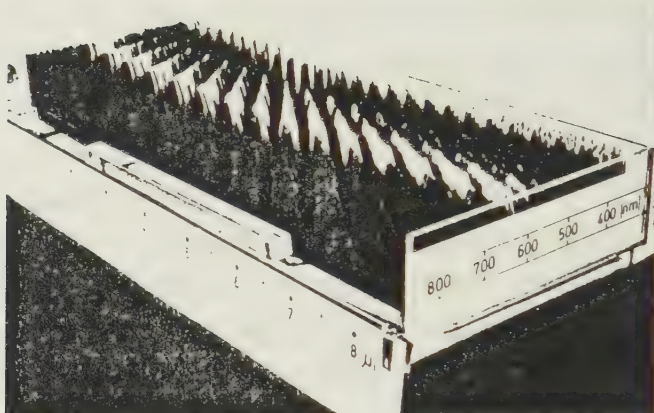


Abb. 2.4.1.1.: Modell zur Verdeutlichung der wechselnden spektralen Zusammensetzung des FIS-Reizes (aus (11))

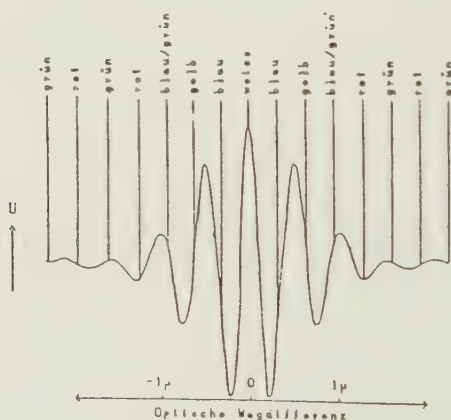


Abb. 2.4.1.2.: Intensitätsschwankung U (aufgezeichnet mit einem breitbandigen Photomultiplier) und subjektive Wahrnehmung der Reizlichtfarbe an verschiedenen Positionen (Zeitpunkten) des FIS-Reizes (aus (24))

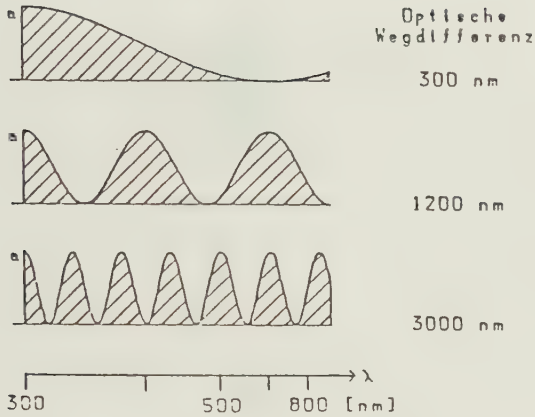


Abb. 2.4.1.3.: Spektrum des Reizlichtes an drei verschiedenen Positionen (Zeitpunkten) des FIS-Reizes (aus (24))

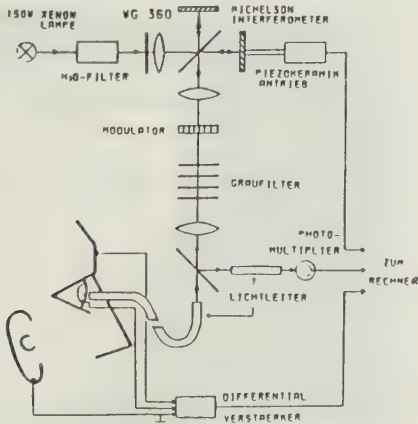


Abb. 2.4.1.4.: Schema des Aufbaus zur FIS-Untersuchung des Menschen (aus (2))

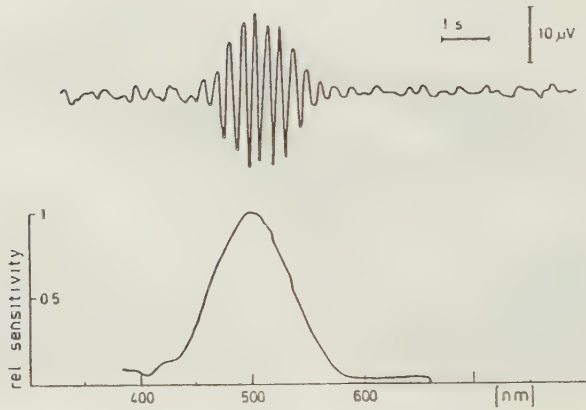


Abb. 2.4.1.5.: FIS-ERG-Antwort (oben) und daraus berechnete skotopische spektrale Empfindlichkeit (unten) des menschlichen Auges (aus (11))

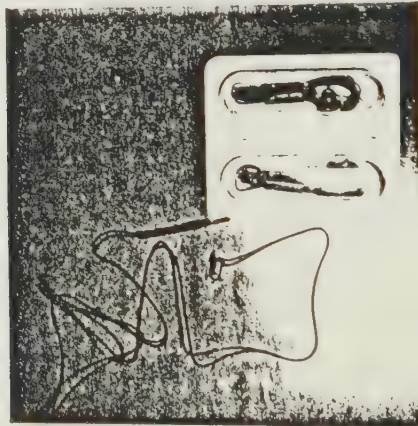


Abb. 2.4.1.6.: Haftschalenelektrode
elektrophysiologischen FIS-Untersuchung

zur

2.4.2. FIS als subjektive Methode zur Farbsinnprüfung

Erste psychophysikalische Untersuchungen mittels FIS wurden gemeinsam mit Barlow durchgeführt (4). Hierbei wurde eine "Farbübertragungs-Funktion" bestimmt, die ein Maß für das Farbauflösungsvermögen darstellt. Bei diesen Experimenten ergab sich, daß die gemessene Übertragungsfunktion bei einer der Testpersonen signifikant unterschiedlich war. Diese Testperson war nach Befunden mit dem Nagelschen Anomaloskop deuteranop. Andere Methoden zur Farbsinnprüfung lieferten bei dieser Testperson nur unbefriedigende Resultate.

Während der oben angesprochenen Experimente fiel den Autoren auf, daß die durch die interferometrische Versuchsanordnung erzeugten ungesättigten Mischfarben (siehe auch Abb. 2.4.2.1.) von der deuteranopen Versuchsperson zum großen Teil falsch bezeichnet wurden. Da der Person bis zu diesen Experimenten ihre Farbsinnstörung nicht bekannt war und somit zufällig in diesen Versuchen entdeckt wurde, schien der FIS-Test ein empfindliches Verfahren zur Feststellung von Farbsinnstörungen zu sein. Diese Laborbeobachtung wurde weiter verfolgt. Dazu wurde eine Anordnung entwickelt, die es erlaubt, die gesamte Abfolge der FIS-Farben als paralleles Streifenmuster auf einer Mattscheibe zu

projizieren. Die Versuchspersonen mußten sodann subjektiv die Grenzen der Farbübergänge einzeichnen und den dazwischenliegenden Farbeindruck benennen. Das Original-Ergebnis einer solchen Untersuchung von Patienten der Augenklinik München ist in Abb. 2.4.2.1. dargestellt. Diese Versuchsperson wurde mit dem Nagelschen Anomaloskop als deuteranomal eingestuft. Aufgrund des in Abb. 2.4.2.1. dargestellten Ergebnisses und ähnlichen Resultaten, die bei ungeübten Versuchspersonen einfach und schnell zu erhalten waren, erschien es interessant, diesen methodischen Ansatz weiter zu verfolgen.

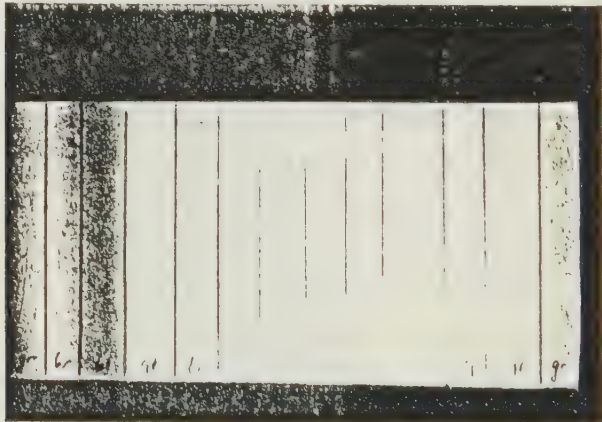


Abb. 2.4.2.1.: Subjektive FIS-Untersuchung (gr=grün, br=braun, bl=blau, rt=rot, li=lila; näheres siehe Text)

2.4.3. Experimentelles Vorgehen

Zur Prüfung von Farbsinnstörungen, wie sie am Ende des letztes Kapitels (Abb. 2.4.2.1.) aufgezeigt wurde, wird ein komplexer optischer Aufbau benötigt, dessen Hauptbestandteil eine Fourier-Interferometrische Apparatur bildet. Dieses Gerät ist äußerst empfindlich gegen Dejustage, Erschütterungen und thermischen Ausdehnungen, da die Farbinterferenzen einen im nm-Bereich stabilen Aufbau erfordern.

Außerdem ist ein wahlweiser Einsatz der FIS-Apparatur zu objektiven (siehe Kapitel 2.4.1.) oder subjektiven Untersuchungen (siehe Kapitel 2.4.2.) ebenfalls nicht praktikabel, weil dabei jedesmal die FIS-Apparatur zeitaufwendig umgebaut werden muß. Zusätzlich wäre für eine eventuelle klinische Routine-Apparatur zur subjektiven Farbsinn-Untersuchung der FIS-Aufbau technisch und finanziell zu aufwendig.

In dieser Arbeit wurde deshalb nach Mitteln und Wegen gesucht, den FIS-Aufbau durch eine einfachere, betriebssichere und unempfindlichere Versuchsvorrichtung zu ersetzen, die einen FIS-ähnlichen Reiz erzeugt und sich in ähnlicher Weise zur subjektiven Farbsinn-Untersuchung einsetzen läßt. Dabei wurde auf eine Idee von Paul und Steiner (persönliche Mitteilung) zurückgegriffen. Diese

beiden Autoren haben einen als "Multiplexer Spektralstimulator" bezeichneten Aufbau entwickelt, der die FIS-Apparatur in weiten Bereichen ersetzen kann. Das Grundprinzip dieses Aufbaus wird im folgenden kurz erläutert. Eine ausführliche Darstellung erfolgt in Kapitel 3.1.

Das Licht einer Lichtquelle wird durch ein Interferenz-Verlauffilter räumlich und spektral zerlegt. Sodann werden die Spektralbereiche zeitlich sinusförmig mit unterschiedlicher Frequenz durch eine Sektorenscheibe moduliert. Anschließend werden die so modulierten Spektralbänder wieder zu einem Reizlicht gemischt und der Untersuchungsperson angeboten.

Die ersten Ergebnisse mit einem Versuchsaufbau zeigen, daß sich die Methode erfolgreich zur spektralen Untersuchung mit mittlerer Auflösung und zur aktionsspektrometrischen Empfindlichkeitsbestimmung sowohl beim Insekten- als auch beim Menschaugen einsetzen läßt.

Die Vorteile der in 3.1. beschriebenen Versuchsausrüstung gegenüber dem FIS-Aufbau liegen in der mechanischen Stabilität gegenüber Störungen, einer hohen Betriebssicherheit und einer einfachen Bedienung. Zusätzlich ist der Aufbau finanziell weniger aufwendig. In der vorliegenden Arbeit wurde deshalb versucht, nach

dem Prinzip des "Multiplexen Spektral-Stimulators" (im
folgenden mit MSS abgekürzt oder als "Spektral-Modulator"
bezeichnet) subjektive Untersuchungen an
Farbsinn-gestörten Patienten durchzuführen.

3.0. Versuchsaufbau und Patientengut

3.1. Experimenteller Aufbau

Der Aufbau zur Untersuchung mit dem "Multiplexen Spektralstimulator" (MSS) besteht aus folgenden Komponenten:

1. Optischer Aufbau,
2. Mechanisch-elektronischer Aufbau,
3. Mikrocomputer

Diese drei Komponenten werden im nachfolgenden besprochen:

3.1.1. Der optische Aufbau

Der optische Aufbau (Abb. 3.1.1.1. und 3.1.1.2.) besteht aus einer Halogen-Kaltlichtquelle (LQ) mit Kondensor (K), deren Licht ein Interferenz-Verlauffilter (IVF) auf einer durch eine Blende (B) erzeugten rechteckigen Fläche von ca. 1x4 cm homogen ausleuchtet. Durch das Interferenz-Verlauffilter wird das weißgelbe Licht der

Halogen-Lampe räumlich spektral zerlegt (siehe Abb. 3.1.1.1.). Die ausgeleuchtete Filterfläche zeigt dabei einen kontinuierlichen Wellenlängenbereich von 410 nm bis 690 nm mit linearer Wellenlängenskala. Zu beachten ist jedoch, daß aufgrund der Interferenzfilter-Eigenschaften jeder Wellenlänge nach Herstellerangaben eine optische Halbwertsbreite von annähernd 20 nm zugeordnet ist.

Der rechteckförmigen Filterfläche eng benachbart ist die Sektorenscheibe (SS) angeordnet (siehe Abb. 3.1.1.3.), die die durch das Interferenzfilter erzeugten Spektrallichter unterschiedlich stark und variabel abdeckt. Auf die genauere Funktion und Wirkung der Sektorenscheibe wird später gesondert eingegangen. Das vom Interferenzfilter spektral zerlegte und von der Sektorenscheibe in der Stärke bewertete Licht wird durch einen Querschnittswandler (QS) mit vorgeschalteter Zylinder-Bikonvex-Linse (ZL) in einem Lichtleiter (LL) mit einem Durchmesser von 5 mm gesammelt und in eine kleine Ulbricht-Kugel (UK1) geleitet. Die Ulbricht-Kugel besteht aus einem im Innern mit weißer Farbe beschichteten Tischtennis-Ball, in den eine seitliche Öffnung für den Lichteintritt und eine ca. 1.5cm große Öffnung für den Lichtaustritt geschnitten wurde. Die Lichtaustrittsöffnung ist mit einem als Mattscheibe (MS1) wirkenden Transparent-Papier abgeschlossen. Die Funktion

der Ulbricht-Kugel ist eine gleichmäßige Durchmischung der im Lichtleiter noch auf die einzelnen Fasern statistisch verteilt vorliegenden Spektralfarben, so daß eine die Mattscheibe betrachtende Versuchsperson einen gleichmäßigen, homogenen Farbeindruck empfindet (siehe auch Abb. 4.2.1.1.- 4.2.1.3.).

Im Abstand von ca. 7 cm ist zusätzlich eine 2. Ulbricht-Kugel (UK2) mit Mattscheibe (MS2) angebracht, die durch eine kleine Lichtquelle (KL) und Farbfolie (FF) eine Vergleichsnorm erzeugt. Diese Norm entspricht dem durch die MSS-Apparatur zu Versuchsbeginn erzeugten Farbeindruck, so daß ein Normalbeobachter beide Mattscheiben als gleich hell und gleich farbig erkennt (siehe Abb. 3.1.1.2.). Durch diese Kalibrierung kann vor jedem Test der ordnungsgemäße Zustand der MSS-Apparatur vom Experimentator leicht und schnell überprüft werden.

Wie oben ausgeführt, wird das in die Ulbricht-Kugel eintretende und die Mattscheibe ausleuchtende Licht in seiner spektralen Zusammensetzung durch die Sektorenscheibe modifiziert. Die Sektorenscheibe (siehe Abb. 3.1.1.3.) hat dabei folgende Eigenschaften:

Aufgrund der besonderen Form der aufgetragenen schwarzen Streifen werden die verschiedenen Spektralbereiche des angeleuchteten Interferenzfilter-Ausschnittes bei einer Umdrehung der Scheibe unterschiedlich häufig durch die

dunklen Muster abgedeckt bzw. durch die hellen Zwischenräume durchgelassen. So erfolgen am äußeren Rand der Scheibe (entspricht beim gewählten Aufbau der Spektralfarbe rot = 690 nm) bei einer Scheiben-Umdrehung 32 Hell/Dunkel-Wechsel, am innersten Rand der Scheibe (blau = 410 nm) dagegen nur 16 Hell/Dunkel-Wechsel, in der Mitte der Scheibe 24 Hell/Dunkel-Wechsel usw. Aufgrund der durch das Interferenzfilter erzeugten räumlichen Trennung der Spektralfarben und ihrer durch die Sektorenscheibe bei fester Umdrehungsgeschwindigkeit zugeordneten unterschiedlichen Frequenzen der Hell/Dunkel-Modulation wird somit eine Kodierung der Wellenlänge durch Modulationsfrequenzen ermöglicht. Auf diese Art erzeugt der Spektral-Modulator einen FIS-ähnlichen Lichtreiz und kann in der beschriebenen Weise zur spektralen Untersuchung von lichtempfindlichen Systemen eingesetzt werden.

Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen der subjektiven Farbsinnprüfung wird die Sektorenscheibe an verschiedenen definierten Positionen festgehalten. Wird z. B. die mit "Weißlichtposition" (WLP) bezeichnete Position gewählt (siehe Abb. 3.1.1.3.), so wird das gesamte beleuchtete Interferenzfilter freigegeben. Nach der Lichtmischung im Lichtleiter und der Ulbricht-Kugel hat man einen gelblichen Farbeindruck. Die Farbabweichung

von dem auf das Interferenzfilter fallenden Halogenlicht, welches weißlicher erscheint, läßt sich durch die spektrale Beschränkung der Interferenzfilter-Blende, durch einen spektralen Gang des Interferenzfilters selbst und durch eine spektrale Beeinflussung des Lichtleiters (dämpft zu kürzeren Wellenlängen) erklären. Sie ist für die Messungen ohne nachteilige Bedeutung, da alle Versuchspersonen unter identischen Versuchsbedingungen untersucht wurden.

Der gleiche Farbeindruck wie an der vorstehend beschriebenen Weißlichtposition (alle Spektralfarben werden durchgelassen) entsteht auch dann, wenn die Sektorenscheibe weit genug (z. B. 130° , siehe Abb. 3.1.1.3.) von der WLP weggedreht ist. Dann werden nur schmale Streifen im Spektrum abgedeckt, und die auf der Mattscheibe beobachtbare Farbe ist ebenfalls gelblich. Da jedoch ca. die Hälfte des Interferenzfilters abgedeckt ist, ist die Intensität auch nur halb so groß wie sie an der WLP erscheint.

In der Nähe der WLP jedoch werden vom Beobachter unterschiedliche Mischfarben auf der Mattscheibe wahrgenommen. Diese Mischfarben beruhen darauf, daß bestimmte Spektralbereiche unterschiedlich stark durch die Sektorenscheibe abgedeckt werden. Die für den in dieser Arbeit durchgeführten MSS-Farbtest verwendeten

Farben entstehen also durch Subtraktion bestimmter Spektralelemente aus dem an der WLP vorliegenden polychromatischen Licht. In jedem Fall sind es komplexe mischfarbige Testlichter, deren spektrale Zusammensetzung in eindeutiger Weise durch die Sektorenscheibe bestimmt wird und nur von der Position der Sektorenscheibe abhängt.

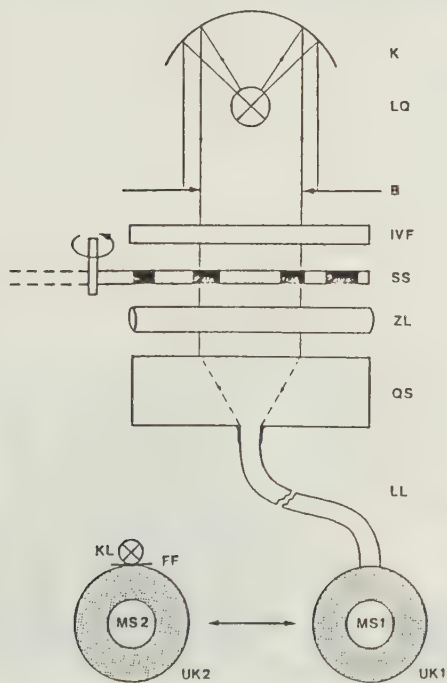


Abb. 3.1.1.1.: Schema des optischen Aufbaus (siehe Text)

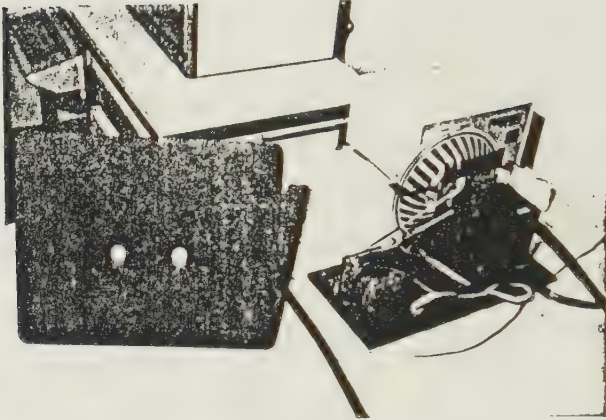


Abb. 3.1.1.2.: Der Versuchsaufbau; die rechts erkennbaren Komponenten sind während des Versuchs in einem Gehäuse untergebracht

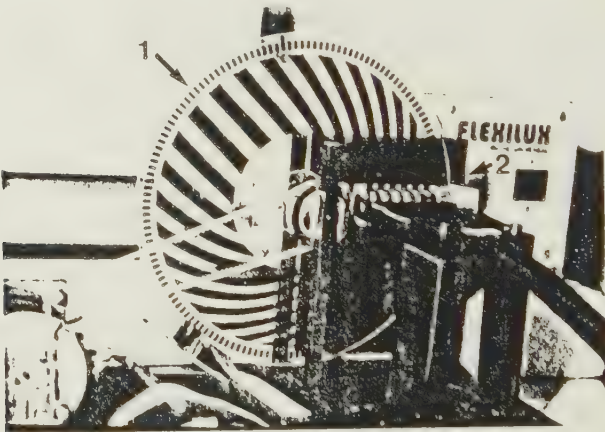


Abb. 3.1.1.3.: Die Sektorenscheibe (1: Position WLP; 2: Position 130°)

3.1.2. Der mechanisch-elektronische Aufbau

Die Sektorenscheibe ist über eine schlupffreie Zahnriemen-Transmission, die gleichzeitig als 1:2-Übersetzung dient, mit einem Schrittmotor verbunden (Abb. 3.1.2.1.). Der Schrittmotor hat eine Auflösung von 1.8 'pro Schritt. Durch die 1:2-Übersetzung läßt sich somit die Sektorenscheibe in Inkrementen von 0.9° positionieren. Zur Festlegung von Absolutpositionen dient eine auf der Sektorenscheibe angebrachte Markierung, die durch eine Gabellichtschranke elektronisch detektiert wird (siehe Abb. 3.1.2.1.).

Die direkte Ansteuerung des Schrittmotors erfolgt über eine elektronische Treiberschaltung, die nach Applikationsvorschlägen der Firma Valvo konzipiert und aufgebaut wurde (Abb. 3.1.2.2.). Die eigentliche Kontrolle der elektromechanischen Komponenten erfolgt durch ein Mikrocomputersystem.

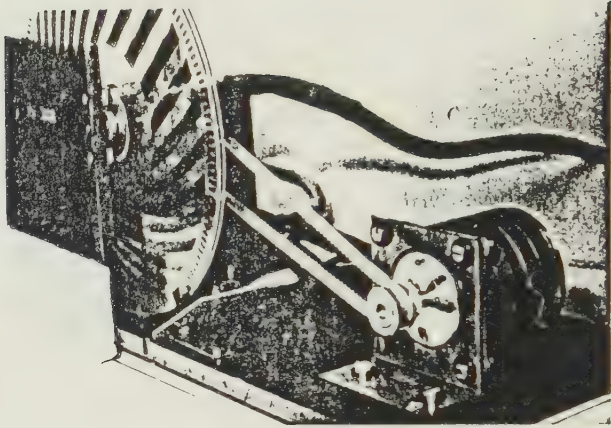


Abb. 3.1.2.1.: Der mechanische Antrieb der Sektorenscheibe

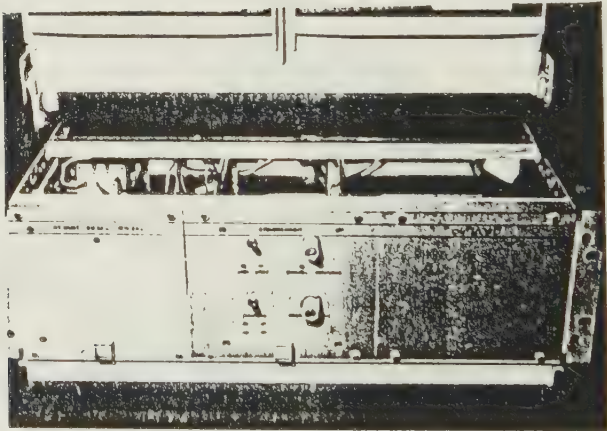


Abb. 3.1.2.2.: Die elektronische Treiberschaltung für den Schrittmotor

3.1.3. Der Mikrocomputer

Der Mikrocomputer (Apple IIe, Abb. 3.1.3.1.) erzeugt über eine Parallel-Schnittstelle Logikpegel zur Ansteuerung des Schrittmotors und erfaßt das Positionssignal der Gabellichtschranke. Somit ist es möglich, die Größe der Bewegung, die Bewegungsrichtung und die Absolutposition der Sektorenscheibe softwaremäßig zu erfassen und zu kontrollieren.

Das Computerprogramm, welches für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche verwendet wurde, ist menuegesteuert und ermöglicht verschiedene Scheibenbewegungen:

a) Durch einen "Reset-Programmteil" bewegt der Computer die Sektorenscheibe solange, bis die Gabellichtschranke das Positionssignal zurückmeldet. Daraufhin setzt der Computer einen internen Zähler auf Null und dreht sodann die Scheibe um eine definierte Anzahl Schritte zu einem vorgewählten Startpunkt. Bei der Versuchsdurchführung wurde jedesmal die Weißlichtposition (keine Abdeckung durch die Sektorenscheibe) als Startposition gewählt.

b) Durch einen "Automatik-Programmteil" wird die Scheibe automatisch um einen definierten Schritt vorwärtsbewegt und die aktuelle Position auf dem Sichtschirm angezeigt.

Nach jeder Drehung ist eine Dateneingabe (siehe unten) möglich. Dieser Programmteil wurde bei dem in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Farbsinn-Test immer aufgerufen. Die Schrittzahl zwischen den einzelnen Meßpunkten betrug dabei "1".

c) Durch einen "Manuell-Programmteil" läßt sich die Scheibe mit Hilfe eines "Joy-Sticks" beliebig vorwärts oder rückwärts und unterschiedlich schnell verdrehen. Die aktuelle Scheibenposition wird ständig auf dem Sichtschirm kontrolliert. Eine Dateneingabe (siehe unten) ist jederzeit an jeder Position (auch beliebig oft wiederholbar) möglich. Dieser Programmteil diente in den Versuchen zur stochastischen mehrmaligen Überprüfung bereits getroffener Aussagen, um deren Sicherheit zu erhöhen.

Bei der Durchführung der Tests mit dem Spektral-Modulator wird der Patient bei verschiedenen Scheiben-Stellungen nach seinem Farbeindruck befragt. Die Antwort des Patienten kann als Dateneingabe im Computer unter der jeweiligen Scheibenposition gespeichert und somit dokumentiert werden. Zusätzliche Programmteile ermöglichen das Erfassen von Patientendaten sowie das Abspeichern bzw. Zurückrufen von Patientendaten auf bzw.

von Diskette als einem nichtflüchtigen Speichermedium. Zusätzlich zum Sichtschirm ist der Ausdruck der Patientendaten in protokollarischer Form auf einem Schnelldrucker möglich (Abb. 3.1.3.2.). Dadurch wird eine einfache und übersichtliche Auswertung der Meßdaten gewährleistet.

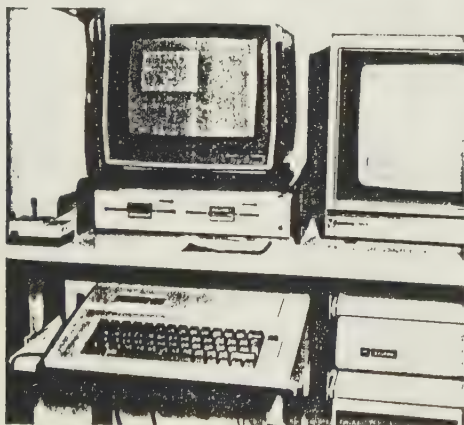


Abb. 3.1.3.1.: Der Mikrocomputer zur Steuerung des Versuchsablaufes und Erfassung der Daten

AUGENKLINIK DER UNIVERSITÄT

MÜNCHEN

Direktor. Prof Dr O -E Lund

8000 München 2 ,Mathildenstr 8
TEL (089) 3140-1

MSS - UNTERSUCHUNG ZUR SUBJEKTIVEN FARBSINN - PRÜFUNG
oo

PATIENT: POHL , WILHELM
GEB AM: 30 09 18
BEFUND : NORM

VERSUCHSNUMMER: 01
VERSUCHS-START: W.L.P
VERSUCHS-TAG : 28 01 85

ERGEBNIS

POSITION FARBEINDRUCK

0	GELBGRÜN
1	HELLGRÜN
2	GRÜN INTENSIVER
3	GRÜN ETWAS STÄRKER
4	GRÜN ETWAS DUNKLER
5	GRÜN NACH BLAU
6	BLAUGRÜN
7	BLAUGRÜN
8	PURPUR
9	PURPUR LEUCHTEND
10	GELB ORANGE
11	GELB
12	GELB
13	HELLER GELB
14	HELL GELB
15	ZITRONENGELB
16	GELBGRÜN
17	HELLGRÜN
18	GRÜN
19	GRÜN
20	GRÜN
21	GRÜN MIT LEICHT BLAU
22	BLAUGRÜN
23	BLAUGRÜN
24	BLAUGRÜN
25	GRAU

** ENDE **

Abb. 3.1.3.2.: Versuchsprotokoll einer MSS-Untersuchung

3.2. Patientengut

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen der Patienten fanden im Zeitraum ca. eines Jahres statt. Es wurden insgesamt 33 männliche Testpersonen gefunden, die folgende Bedingungen erfüllten:

- 1) Aufgrund der Anamnese und den Befunden bei den herkömmlichen Untersuchungen liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit eine ausschließlich kongenitale Farbsinnstörung vor.
- 2) Nach Beschreibung der Untersuchung mit dem Spektral-Modulator erklären sich alle Testpersonen zur Mitarbeit bereit.
- 3) Die Personen können die mit dem Spektral-Modulator erzeugten Mischfarben auch sprachlich klar bezeichnen, d. h. auf die Untersuchung von Kindern oder Ausländern mit Sprachschwierigkeiten wurde verzichtet.
- 4) Die Untersuchungspersonen ließen sich aufgrund der mit dem Nagelschen Anomaloskop erhaltenen Befunde bezüglich der Farbsinnstörung einordnen.

Das Alter der Probanden lag zwischen 16 und 46 Jahren, das mittlere Alter betrug 29.3 Jahre.

In Tab. 3.2.1. ist dargestellt, wie sich die 33

Versuchspersonen, die obige Bedingungen erfüllten, auf die verschiedenen Farbsinnstörungen verteilen.

Farbsinnstörung	Anzahl n
Protanop	11
Protanomal	2
Deutanop	11
Deutanomal	9
Tritanop	0
Tritanomal	0
Summe	33

Tab. 3.2.1.: Aufteilung der 33 Testpersonen auf die verschiedenen Farbsinnstörungen

Wie aus der Tabelle ersichtlich, wurden keine Personen mit Tritan-Störungen gefunden; auf die Untersuchung dieser Farbsinnstörung mußte deshalb im Rahmen dieser Arbeit verzichtet werden.

3.3. Versuchsdurchführung

Vor der Untersuchung mit dem Spektral-Modulator wurden zunächst alle Patienten einer allgemeinen augenärztlichen Untersuchung zugeführt.

3.3.1. Allgemeine Voruntersuchungen

Bei jedem Patienten wurde nach ausführlicher Anamneseerhebung eine Visusbestimmung, die Untersuchung mit der Spaltlampe und eine Beurteilung des Augenhintergrundes vorgenommen (großer ophthalmologischer Status). Nur bei Patienten, die als "augengesund" bezeichnet werden konnten, schlossen sich daran die klinischen Tests zur Prüfung von Farbsinnstörungen an:

1. Ishihara Test
2. TMC Test
3. Panel D-15 Test
4. Untersuchung mit dem Nagel-Anomaloskop

Eine nähere Beschreibung dieser Untersuchungsverfahren erfolgte an früherer Stelle (siehe Kap. 2.3.).

Der Untersuchungsgang sowie die Protokollierung der Ergebnisse bei den Probanden geschah nach einem von Zrenner (28) vorgeschlagenen Schema (Abb. 3.3.1.1.). Damit wurde gewährleistet, daß alle Untersuchungen der Patienten unter annähernd gleichen Bedingungen stattfanden.

Anschließend an diese allgemeinen Voruntersuchungen wurden die kongenital farbsinngestörten Probanden mit dem MSS-Test untersucht.

1 FARBTAFELN [75 cm Abstand, 3 s pro Tafel, falsch gelesene einkreisen]

ISHIHARA-Y													Normal bis 2 Fenster													TNC		SELVAGE-IT		AND TAFELN	
OD	☐	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12														II-1				
OS	☐	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24														II-2				
BIN	☐																														
OD	☐	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12														II-1				
OS	☐	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24														II-2				
BIN	☐																														

2 ARRANGEMENT-TESTS

Panel D-15 [sal]. Lanthony Panel D-15 [desal]

☐ sal ☐ desal

☐ sal ☐ desal

☐ sal ☐ desal

☐ sal ☐ desal

☐ OD ☐ OS ☐ BIN

☐ OD ☐ OS ☐ BIN

☐ OD ☐ OS ☐ BIN

☐ OD ☐ OS ☐ BIN



Abb. 3.3.1.1.: Fortsetzung nächste Seite

3.3.2. Untersuchungen mit dem Multiplexen Spektralstimulator (MSS-Untersuchung)

Wie unter 3.1.1. beschrieben, wird mit der MSS-Apparatur polychromatische Beleuchtung auf einer Mattscheibe erzeugt, deren Farbeindruck durch die Versuchsperson subjektiv beurteilt werden muß.

Im einzelnen wurde folgender Versuchsablauf eingehalten: Die Versuchsperson saß im Abstand von ca. 50 cm möglichst entspannt vor der Mattscheibe. Ausgehend von der Weißlichtposition wurde zuerst der in Kap. 3.1.3. beschriebene Automatik-Programmteil mit einer Positionierschrittweite = 1 (entspricht einem Drehwinkel von 0.9° der Sektorenscheibe) durchgeführt. Zu jeder Position wurde die Versuchsperson nach ihrem Farbeindruck befragt und die erhaltene Aussage in den Computer eingegeben. Im Durchschnitt konnten sich ändernde Farbeindrücke bis zur ca. 60. Position (= 54° Verdrehung der Sektorenscheibe) ermittelt werden. Eine weitere Verdrehung der Sektorenscheibe führte im allgemeinen zu keinem sich ändernden Farbeindruck mehr.

Die durchschnittliche Versuchsdauer betrug ca. 20 Minuten. Bei manchen unsicher aussagenden Probanden jedoch wurden wesentlich längere Versuchszeiten benötigt. An die Durchführung dieses Farbtestes mit einer

automatischen Verdrehung der Sektorenscheibe schloß sich die Eingabe der Patientendaten und das Abspeichern des Versuchsergebnisses auf Diskette an.

Bei sehr unsicher aussagenden Personen oder zur Überprüfung von drastisch normabweichenden Antworten wurde anschließend der in 3.1.3. beschriebene Manuell-Programmteil durchgeführt. Dazu hat man gezielt definierte Positionen der Sektorenscheibe vorgegeben und die Versuchsperson zum Farbeindruck befragt. Auch dieses Ergebnis wurde anschließend auf Diskette gespeichert.

Nach Beendigung des Gesamt-Versuches wurden die Testergebnisse sofort auf einem Matrix-Drucker aufgelistet. Ein Beispiel für das so erhaltene Versuchsprotokoll ist in Abb. 3.1.3.2. dargestellt.

Die Aussagen des Probanden zu seinem subjektiven Farbeindruck konnten anschließend mit den subjektiven Aussagen von nicht farbsinngestörten Personen verglichen und eventuelle Normabweichungen in Tabellen eingetragen werden. Eine Tabelle faßte dabei jeweils diejenigen Versuchspersonen zusammen, die nach dem Nagelschen Anomaloskop die gleichen Farbsinnstörungen zeigten.

4.0. Ergebnisse

Die folgenden beiden Kapitel beschreiben die Ergebnisse, die aus den Untersuchungen an kongenital farbsinngestörten Patienten gewonnen wurden. Die Klassifizierung der Farbsinnstörung wurde dabei (wie schon oben erwähnt) nach dem mit dem Nagelschen Anomaloskop erhaltenen Befund getroffen.

Im folgenden Kapitel werden zunächst die Ergebnisse der allgemeinen Voruntersuchungen dargestellt. Daran schließen sich die nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewerteten Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Spektral-Modulator an.

4.1. Ergebnisse der allgemeinen Voruntersuchungen

Aufgrund der Durchführung der allgemeinen Voruntersuchungen (Kap. 3.3.1.) handelte es sich bei den Testpersonen ausschließlich um "augengesunde", farbanomale Patienten. Die Farbsinnstörung wurde mit Hilfe des Ishihara-Tests, des TMC-Tests, des desaturierten Panel D-15-Tests (PD 15) und der Anomaloskopuntersuchung nach Nagel untersucht. Die Anwendung des TMC-Testes ergab bei keinem der Probanden einen Anhalt für eine Tritan-Störung, so daß im weiteren diese Anomalie unberücksichtigt bleibt. Für die anderen Patientengruppen lassen sich folgende Ergebnisse festhalten:

a) Protanope Versuchspersonen (n=11)

Alle Versuchspersonen dieser Gruppe gaben im Ishihara-Test falsche Antworten. Größtenteils wurden alle Positionen außer Nr. 1 und 24 falsch benannt.

Im Panel D-15-Test erzielten bis auf eine Ausnahme alle Personen mehr als vier Verwechslungen. Betrachtet man die Verbindungslinien der Verwechslungen (siehe hierzu auch Kap. 2.3., Pigmentfarbentests und Abb. 3.3.1.1.), so erkennt man, daß sie überwiegend mit der Protan-Achse

zusammenfallen. Das Ergebnis des PD 15-Testes ist in Tab. 4.1.1. zusammengefaßt.

Testperson	Anzahl der Ver- wechslungen	Anzahl der in der Pro- tan-Achse liegenden Ver- wechslungen
1	5	3
2	10	7
3	7	5
4	8	5
5	11	7
6	1	1
7	6	6
8	7	4
9	6	5
10	9	6
11	8	5

Tab. 4.1.1.: Anzahl der beim PD 15-Test auftretenden Verwechslungen sowie deren in der Protan-Achse liegender Anteil

Die Anomaloskop-Untersuchungen nach Nagel führten zu einem sehr einheitlichen Befund. Die Testpersonen

stellten alle sicher die Protanop-Gerade ein (siehe Kap. 2.3., Nagel-Anomaloskop und Abb. 3.3.1.1.); die Abweichungen der Gelb-Werte von der Protanop-Geraden bei verschiedenen vorgegebenen Rot/Grün-Mischverhältnissen waren kleiner als 5 Skaleneinheiten. Es wird jedoch noch einmal betont, daß letztlich immer der Anomaloskop-Test nach Nagel zur Klassifizierung der Farbsinn-Störung diente. Personen, die sehr unsicher oder von der Normkurve abweichend einstellten, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit als ungeeignet ausgesondert. Dies führt zu der beobachteten guten Übereinstimmung der Anomaloskop-Befunde.

b) Protanomale Versuchspersonen (n=2)

Ähnlich wie bei der protanopen Gruppe wurden von den beiden protanomalen Patienten viele Farbtafeln nach Ishihara nicht erkannt. Übereinstimmend richtig wurden nur die Positionen 1, 18, 19 und 24 benannt.

Im PD 15-Test konnte eine Testperson die Farbsteine problemlos in der richtigen Reihenfolge anordnen. Die zweite Testperson verwechselte gleich zu Beginn einmal in der Protanop-Achse (von Position 1 nach 15) und legte anschließend die Steine in richtiger, aber umgekehrter Anordnung (von Position 14 nach 2) aus. Soweit es sich

aus den nur zwei Testergebnissen verallgemeinern läßt, ist der Nachweis der Protanomalie mit dem Arrangement-Test PD 15 problematisch.

Auch die Resultate der Anomaloskop-Untersuchung nach Nagel sind bei den Testpersonen uneinheitlich. Zwar zeigen sich beide als eindeutig protanomal farbsinngestört (Auswahlkriterium für die Gruppen-Klassifizierung!) und haben vergleichbare Anomalie-Quotienten ($AQ = 0.17$ bzw. 0.19). Während aber die Testperson 1 nur in einem sehr engen Wertebereich den Farbabgleich der Anomaloskop-Teilflächen erreichte (Mischschraube = 63; Gelbschraube = 7), gelang Testperson 2 der Farbabgleich über einen größeren Bereich (Mischschraube = 50-63; Gelbschraube = 12-8).

c) Deuteranope Versuchspersonen ($n=11$)

Auch hier gaben beim Ishihara-Test alle Testpersonen überwiegend falsche Antworten. Die einzigen meist richtig erkannten Tafeln waren, wie bei den vorgenannten Gruppen, die Nummern 1 und 24.

Beim Arrangement-Test PD 15 legten 3 Testpersonen die Farbsteine in der richtigen Reihenfolge. Die übrigen 8 Versuchspersonen verwechselten zwischen 4 und 12 Positionen. Dabei erfolgten die Verwechslungen zum großen

Teil in der Deutan-Achse. Dies ist auch den Angaben aus Tabelle 4.1.2. zu entnehmen.

Testperson	Anzahl der Ver- wechslungen	Anzahl der in der Deu- tan-Achse liegenden Ver- wechslungen
1	4	2
2	4	3
3	12	7
4	10	6
5	0	0
6	7	6
7	0	0
8	9	7
9	0	0
10	7	5
11	5	3

Tab. 4.1.2.: Anzahl der beim PD 15-Test auftreten-
den Verwechslungen sowie deren in der Deutan-
Achse liegender Anteil

Bei der Untersuchung mit dem Nagelschen Anomaloskop

konnten alle Testpersonen anhand ihrer Einstellwerte sicher in die Gruppe der deuteranop Farbsinngestörten eingeordnet werden. Die Abweichungen der angegebenen Gelbwerte bei verschiedenen definierten Rot/Grün-Verhältnissen waren kleiner als 3 Skaleneinheiten. Auch hier ist die Homogenität der Gruppe damit erklärbar, daß die Anomaloskop-Untersuchung als Auswahl-Kriterium diene.

d) Deuteranomale Versuchspersonen (n=9)

Die Gruppe der deuteranomal farbsinngestörten Patienten antwortete ebenso wie die Personen der vorhergehenden Gruppen größtenteils falsch beim Ishihara-Test. Auch hier wurden nur die Tafeln 1 und 24 von allen Testpersonen richtig benannt.

Beim Arrangement-Test PD 15 waren in dieser Gruppe 7 Personen in der Lage, die richtige Reihenfolge der Farbsteine einzuhalten. Die übrigen beiden Testpersonen verwechselten nur eine relativ geringe Anzahl von Positionen; die Richtung der Verwechslung entsprach jedoch meist der Deutan-Achse, wie aus Tab. 4.1.3. erkennbar. Insgesamt zeigt sich jedoch, daß bei den hier durchgeführten Untersuchungen die Klassifizierung der Deuteranomalien mit dem Panel D-15-Test nur unsichere

Resultate ergab.

Testperson	Anzahl der Ver- wechslungen	Anzahl der in der Deu- tan-Achse liegenden Ver- wechslungen
1	0	0
2	2	1
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	5	3
8	0	0
9	0	0

Tab. 4.1.3.: Anzahl der beim PD 15-Test auftretenden Verwechslungen sowie deren in der Deutan-Achse liegender Anteil

Die aus der Untersuchung mit dem Nagelschen Anomaloskop erhaltenen Wertepaare zeigten bei allen Versuchspersonen eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Werten für eine deuteranomale Farbsinnstörung. Die Abweichung

der Gelb-Einstellung von den Norm-Werten bei vorgegebenen Rot/Grün-Verhältnissen betrug nie mehr als 3 Skaleneinheiten. Der Anomalie-Quotient lag im Bereich von 2.6 - 5.1. In Anbetracht, daß hierbei Werte zwischen 2 und 20 (im Extremfall auch darüber) möglich sind, zeigen sich die Patienten aufgrund des Anomaliequotienten als homogene Gruppe. Hinsichtlich der möglichen Einstellbreite für einen Farbabgleich jedoch ergeben sich auch bei den Deuteranomalien wie bei den beiden Protanomalien starke Schwankungen.

4.2. Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Multiplexen Spektralstimulator

Im nachfolgenden Kapitel werden zuerst anhand von Einzel-Resultaten der Untersuchungen mit dem Spektral-Modulator die angewandten Methoden der Auswertung und Darstellung der Versuchsprotokolle erläutert. Die dabei gewonnenen Versuchsergebnisse werden in Kapitel 4.2.2. für die verschiedenen Gruppen der untersuchten Farbfehlsichtigen aufgeführt.

4.2.1. Die Erläuterung der Auswertungs-Methoden anhand von Einzel-Resultaten und die verwendeten Arten der Ergebnis-Darstellung

Wie im Kapitel 3.3.2. beschrieben, wurde im Anschluß an die allgemeinen Voruntersuchungen der Test mit dem Spektral-Modulator durchgeführt. Die protokollierten subjektiven Aussagen der Patienten hinsichtlich der wahrgenommenen Testfarben konnten dann mit den Angaben von farbnormalen Versuchspersonen verglichen und bezüglich etwaiger Abweichungen ausgewertet werden. Die Normangaben wurden dabei durch 7 normalsichtige Versuchspersonen ermittelt, deren Angaben eindeutig übereinstimmend waren oder im Vergleich zu den Aussagen der Farbsinngestörten nur geringfügig differierten. Zur Illustration dieses Sachverhaltes und zur Festlegung, wann eine Aussage der Farbfehlsichtigen als fehlerhaft gewertet wurde, dienen die folgenden Abbildungen.

In Abb. 4.2.1.1. ist der annähernde¹⁾ Farbeindruck dargestellt, den ein Betrachter für die erste und letzte Testposition des Spektral-Modulators wahrnimmt. Wie man erkennt, ist auch für einen Normalsichtigen dieser

1) Verfälschungen durch das Filmmaterial oder die Reproduktion sind möglich

Farbton nicht einfach einzuordnen. Er liegt grob im Bereich zwischen gelb und grün. Deshalb wurden hier als fehlerhafte Aussagen nur die gewertet, die eindeutig auf einem anderen "Grundfarben-Eindruck"¹⁾ basieren; so wurden Angaben wie gelblich oder grünlich (auch noch grau oder weißlich) als richtig, Aussagen wie rötlich, rot oder bräunlich (vor allem bei Deutangestörten) dagegen als fehlerhaft gewertet.

In Abb. 4.2.1.2. sind die aufeinanderfolgenden Positionen 7 und 8 des durchgeführten Tests dargestellt. Während der Normalsichtige Position 7 in der Nähe der Farbwahrnehmung "blaugrün" ansiedelt, und damit auch die Angaben blau oder grün als richtig galten, wird die Position 8 (von Normalsichtigen als Umschlag ins Rote gesehen) von mehreren Protangestörten fälschlich als blau oder türkis wahrgenommen. Auch die Aussage "grün und rot gemischt" für Position 8 wurde als Fehler gedeutet.

In Abb. 4.2.1.3. sind aufeinanderfolgende Positionen aus dem Bereich 14-20 des durch den Spektral-Modulators erzeugten Tests abgebildet. Während normalsichtige Versuchspersonen einen Übergang von gelb nach grün im Bereich der Positionen 16-18 zu erkennen meinen, wurden

1) Als "Grundfarben" werden im nachfolgenden die Farben lila, blau, grün, gelb, orange und rot bezeichnet

z. B. die Aussagen "gelb" (oder sogar orange) ab Position 16 als Fehlaussagen bewertet, da jede untersuchte Normalperson spätestens bei Position 16 in ihrer Aussage zur Bewertung des Farbtons ein Synonym für "grün" oder "grünlich" verwendete.

Zusammenfassend kann man somit sagen, daß eine Aussage immer dann als normabweichend galt, wenn

1. eine andere "Grundfarbe" als die Norm genannt wurde oder wenn
2. bei einer durch einen Farbübergang neu auftretenden "Grundfarbe" diese nicht erkannt wurde.

Die Überprüfung der Versuchsprotokolle von farbsinngestörten Patienten nach obigen Regeln ergab Resultate, die nach verschiedenen Methoden ausgewertet wurden. Diese Auswerte-Methoden werden nachfolgend beschrieben.

a) Bei der als "Fehlerposition" bezeichneten Dárstellung wird die Anzahl der falsch aussagenden Personen einer Gruppe in Abhängigkeit von der Test-Position (bis zu Position 55) des Spektralmodulators angegeben (z. B. Abb. 4.2.2.1.). In dieser Auswertung erkennt man erstens die Verteilung der von der Norm abweichenden Angaben über den Testbereich, zweitens die Form und Schärfe dieser

Häufigkeitsverteilungen selbst und drittens die Wahrscheinlichkeit für die Falschaussagen in der jeweiligen untersuchten Gruppe. Zum Verständnis der graphischen Darstellung muß noch angemerkt werden, daß nur an denjenigen Einzelpositionen oder Positionsbereichen Falschaussagen eingetragen wurden, an denen mindestens ein Drittel der Patientengruppe fehlerhafte Angaben machte. Deshalb sind keine Fehlerhäufigkeiten unterhalb 33% für Einzelpositionen oder Gruppenmaxima in den Fehlerpositions-Abbildungen zu finden, wodurch sich die Übersichtlichkeit dieser Darstellungsform erhöht.

b) Bei der als "Fehleranzahl" bezeichneten Darstellung wird die Anzahl der Falschangaben für den gesamten Test nach den jeweiligen Testpersonen aufgeschlüsselt (z. B. Abb. 4.2.2.2.). Diese Art der Abbildung wurde gewählt, da sie eine Aussage über die Homogenität der Testgruppen zuläßt, die allein anhand der Fehlerpositions-Abbildungen nicht getroffen werden kann. Gleichzeitig ist aus den Fehleranzahl-Darstellungen leichter erkennbar, wie viele Fehler im Mittel von jeder Testgruppe gemacht wurden und ob hier zwischen den Gruppen signifikante Unterschiede existieren.

c) Die dritte Form der Darstellung, eine als "Antwortspektrum" (z. B. Abb. 4.2.2.3.) bezeichnete Auftragung, wurde gewählt, da weder die Darstellung a) noch die Darstellung b) Aufschlüsse darüber geben kann, ob und wie die unterschiedlichen Farben an "relevanten" (siehe unten) Testpositionen in ihrer Qualität wahrgenommen wurden. Deshalb werden im Antwortspektrum die Häufigkeiten einer Farbbezeichnung in Abhängigkeit der wahrgenommenen polychromatischen Farben dargestellt. Diese Auftragung läßt gut erkennen, in welche spektrale Richtung die Falschaussagen der Testpersonen in den einzelnen Gruppen verschoben sind. Somit sollten auch eventuelle Unterschiede zwischen den verschiedenen Untersuchungsgruppen aufdeckbar sein. Die Auswahl der in dieser Darstellung c) abgebildeten Positionen erfolgte einmal aufgrund einer dazugehörigen hohen Fehlerquote. Zum anderen wurden aber auch diejenigen Testfarben berücksichtigt, bei denen qualitativ auffällige Falschaussagen auftraten (z. B. blau anstelle von rot). Die nach diesen Kriterien ausgewählten Punkte wurden als "relevante" Testpositionen bezeichnet.

Die unter a) bis c) beschriebenen Auswertungen werden nachfolgend für die im Rahmen dieser Arbeit mit dem Spektral-Modulator getesteten Patienten als Untersuchungsergebnisse dargestellt.

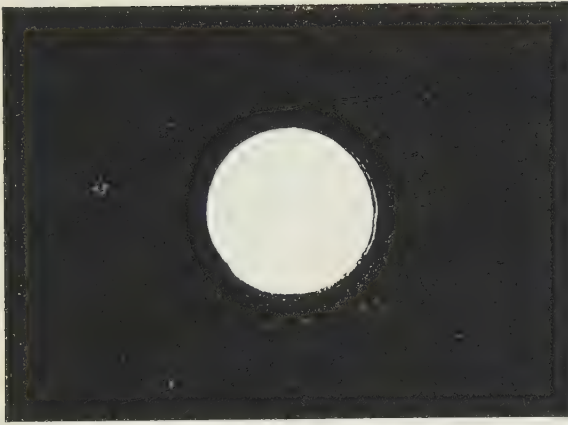


Abb. 4.2.1.1.: Farbeindruck beim MSS-Test an der ersten bzw. letzten Testposition

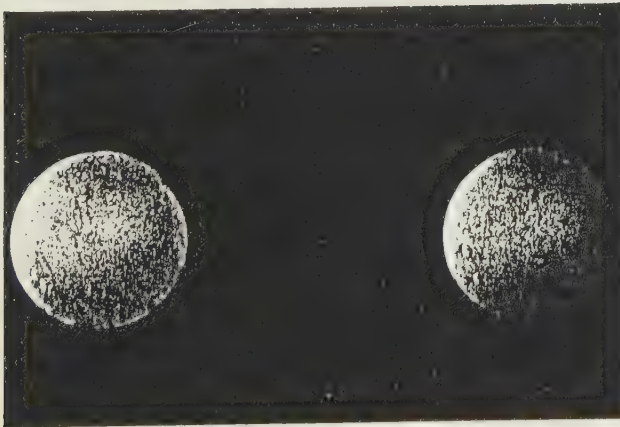


Abb. 4.2.1.2.: Farbeindruck beim MSS-Test an den Testpositionen 7 (links) und 8 (rechts)

Abb. 4.2.1.3.: Farbeindruck beim MSS-Test an folgenden
Testpositionen (von links nach rechts): 13, 15, 16,
17,19, 21

4.2.2. Die Auswertung und Darstellung der mit dem Spektral-Modulator durchgeführten Untersuchungen

Für die hier untersuchten vier Gruppen von farbsinngestörten Patienten ergaben sich bei Anwendung der in Kapitel 4.2.1. beschriebenen Auswerte-Methoden folgende Resultate:

a) Protanope Versuchspersonen (n=11)

In Abb. 4.2.2.1. sind die "Fehlerpositionen" der protanopen Versuchsgruppe aufgetragen. Diese Abbildung zeigt, daß mehr als die Hälfte der untersuchten Probanden an vier Einzelpositionen und in drei Positionsbereichen fehlerhaft antwortet. Betrachtet man die Einzelpositionen, so erkennt man, daß besonders die Position 43 sowie Position 49 zu Falschantworten führt; bei Position 49 machen 10 der 11 Testpersonen eine von der Norm abweichende Farbangabe. Bezüglich der Positionsbereiche treten vor allem zwischen Position 33 und 36 Fehlantworten auf; an Position 35 beschreiben 9 der 11 Patienten einen Norm-abweichenden Farbeindruck.

In Tab. 4.2.2.1. sind die Fehler für die Positionen 43, 49 und 32-38 für jede Versuchsperson durch ein Kreuz markiert. Wie aus der Tabelle ersichtlich, machen die

Patienten in 100% der Fälle mindestens eine Falschaussage, wenn man die Positionen 43 und 49 zusammenfaßt oder den Bereich 32-38 testet.

Versuchs- person	Position mind.l			Position										mind.l Fehler
	43	49	Fehler	32	33	34	35	36	37	38	Fehler			
1	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x			x
2	x	-	x	-	x	x	x	x	x	x	x			x
3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-			x
4	-	x	x	-	x	x	x	-	-	-	-			x
5	x	x	x	-	x	x	-	-	-	-	x			x
6	-	x	x	-	x	x	x	-	-	-	-			x
7	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-			x
8	x	x	x	x	x	x	x	x	-	-	-			x
9	x	x	x	-	-	-	x	x	x	-	-			x
10	-	x	x	-	x	x	x	x	-	-	-			x
11	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x			x

Falschaussagende

Versuchspersonen 100%

100%

Tab. 4.2.2.1.: Die Falschaussagen der Versuchspersonen an Einzelpositionen und bei einer kombinierten Bewertung mehrerer Positionen

Die Abbildung 4.2.2.2. stellt die "Fehleranzahl" der protanopen Versuchspersonen für den gesamten Test (55 Testpositionen) dar. Die Anzahl der als falsch gewerteten Antworten beträgt minimal 7 (12.5%) und maximal 22 (39.3%). Der Mittelwert liegt bei 16 (29.1%). Bei Annahme einer Normalverteilung ergibt sich eine Standardabweichung von ± 4.31 ($\pm 26.9\%$ des Mittelwerts). Beim Vergleich mit den Gruppen ähnlicher Stichproben-Zahl (Deutan-Gruppen; siehe auch dort) erkennt man, daß das protanope Patientenkollektiv die homogenste Testgruppe bezüglich der Anzahl der Falschaussagen gewesen ist.

In den Abbildungen 4.2.2.3. bis 4.2.2.6. sind die Antwortspektren der protanopen Patienten an verschiedenen "relevanten" Testpositionen (Nr. 8, 17, 35, 49) dargestellt. Es zeigt sich, daß die wahrgenommenen Farbeindrücke im Grundfarben-Spektrum nicht ausschließlich links bzw. rechts von der Normfarbe zu liegen kommen. (z. B. Abb. 4.2.2.6.). Auch ist die Häufigkeit von Farbangaben nicht vom spektralen Abstand der genannten Antwort zur Normfarbe abhängig (z. B. Abb. 4.2.2.3.).

Es sei hier noch einmal betont, daß die mit dem Spektral-Modulator erzeugten Farben polychromatische

Mischfarben sind; die gewählte Darstellung zeigt also keine physikalische Auftragung von Wellenlängen, sondern dient zur Verdeutlichung von Farbwahrnehmungen.

Da sich der Farbeindruck "grau" bei Position 25 bzw. 43 nicht spektral erfassen läßt, sind in Tab. 4.2.2.2. die dazugehörigen Falschantworten der protanopen Patienten wörtlich wiedergegeben. Es zeigt sich, daß bei beiden Positionen vorwiegend rötliche Farbtöne beschrieben wurden, aber auch Antworten aus nahezu jedem anderen Spektralbereich vorliegen. Hierbei ist zu bemerken, daß alle untersuchten Normalpersonen in ihrer Antwort die Bezeichnungen "grau" oder "weißlich" verwendeten, die "Farbe" also relativ einheitlich beschrieben.

Versuchs- person	Position 25	Position 43
1	-	rot
2	leicht violett	gelb
3	-	grün
4	grün	-
5	hellrot	rötlich
6	rosarot	-
7	dunkelblau	tiefblau
8	rötlich	violett
9	-	purpur
10	-	blaßgrün
11	-	grün

Tab. 4.2.2.2.: Farbeindruck der protanopen Patienten an den Positionen 25 und 43 (- : "grau")

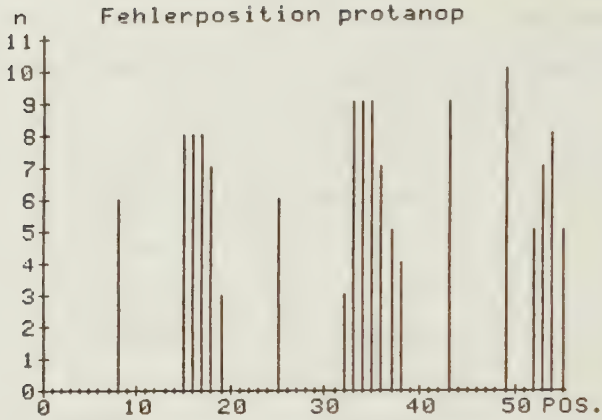


Abb. 4.2.2.1.: Fehlerpositionen der protanopen Gruppe;
n: Anzahl der Probanden;
POS.: Position des Spektral-Modulators

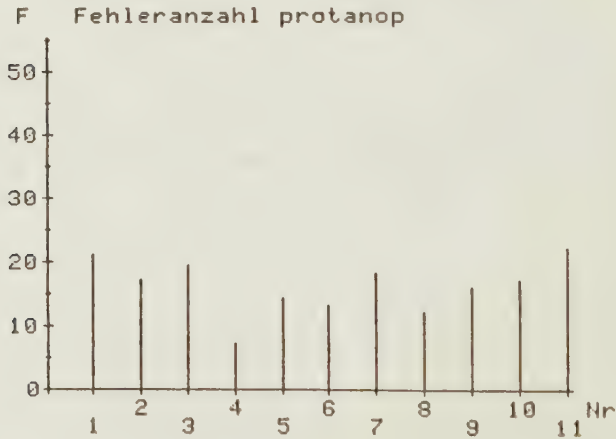


Abb. 4.2.2.2.: Fehleranzahl der protanopen Gruppe;
F: Anzahl der Falschaussagen; Nr : Patientennummer



Abb. 4.2.2.3.: Antwortspektrum der protanopen Gruppe an der Position 8 des Spektral-Modulators;
n: Anzahl der Probanden; Pfeil: Korrekte Farbangabe

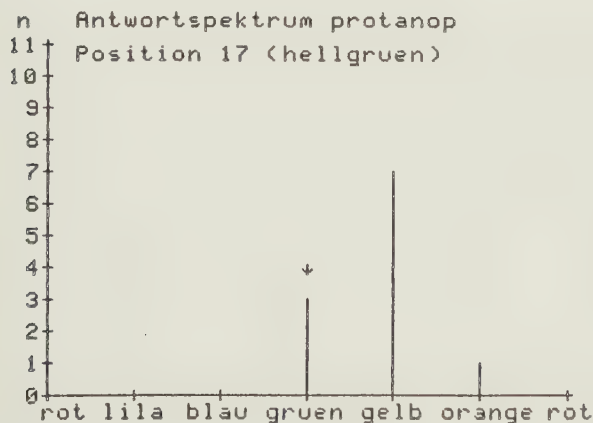


Abb. 4.2.2.4.: Antwortspektrum der protanopen Gruppe an der Position 17 des Spektral-Modulators;
n: Anzahl der Probanden; Pfeil: Korrekte Farbangabe

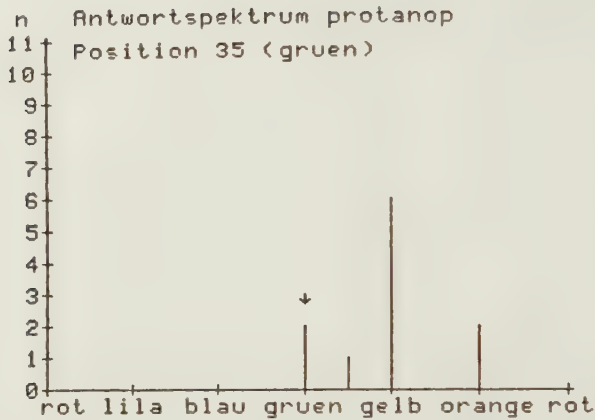


Abb. 4.2.2.5.: Antwortspektrum der protanopen Gruppe an der Position 35 des Spektral-Modulators;
n: Anzahl der Probanden; Pfeil: Korrekte Farbangabe

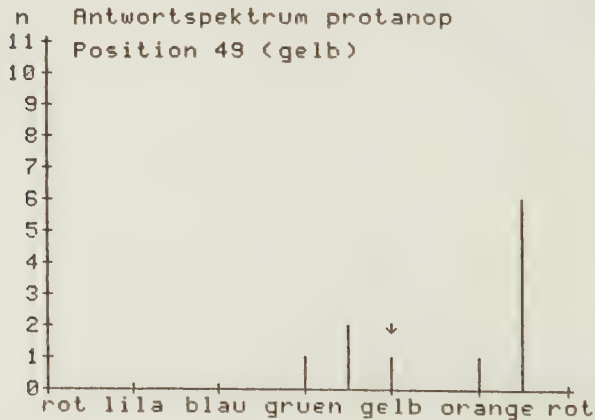


Abb. 4.2.2.6.: Antwortspektrum der protanopen Gruppe an der Position 49 des Spektral-Modulators;
n: Anzahl der Probanden; Pfeil: Korrekte Farbangabe

b) Protanomale Versuchspersonen (n=2)

In Abb. 4.2.2.7. sind die "Fehlerpositionen" für die beiden als protanomal eingestuften Patienten aufgetragen. Da nur zwei Versuchspersonen zur Verfügung standen, sind hier alle Falschantworten berücksichtigt worden. Es lassen sich dabei drei Einzelpositionen und drei Positionsbereiche unterscheiden. Bis auf die hier nicht vorhandene Fehlerposition 49 stimmen die Angaben (unter Berücksichtigung der geringen Stichprobenzahl) annähernd mit den Einzelpositionen und Bereichen der protanopen Gruppe überein, wenn auch die beiden protanormalen Patienten insgesamt an weniger Positionen Fehler zu machen scheinen. Da leider nur zwei protanomale Patienten zu Verfügung standen, muß das Ergebnis in dieser Form belassen werden.

Die in Abb. 4.2.2.8. dargestellten Fehleranzahlen ergeben ein homogenes Bild von 12 bzw. 13 Falschantworten. Eine Verallgemeinerung dieser im Verhältnis zur protanopen Gruppe geringen Fehleranzahl ist jedoch bei nur zwei Versuchspersonen nicht möglich.

Die Antworten der beiden protanormalen Patienten an den "relevanten" Positionen 17 und 35 ("grün") des Spektral-Modulators zeigen, daß genauso wie bei der vorhergehenden Versuchsgruppe "gelb" genannt wird. An den

Positionen 8 und 49 wurden im Gegensatz zu den protanopen Probanden keine Falschaussagen gemacht.

Aus Tab. 4.2.2.3. sind die Farbeindrücke an den Positionen 25 und 43 ("grau") zu entnehmen. Auch hier überwiegt, wie bei den protanopen Versuchspersonen, der rötliche Farbeindruck.

Versuchs- person	Position 25	Position 43
1	blau-rot	rötlich
2	lila	grünrosa

Tab. 4.2.2.3.: Farbeindruck der protanomalen Patienten an den Positionen 25 und 43
(Norm: "grau")

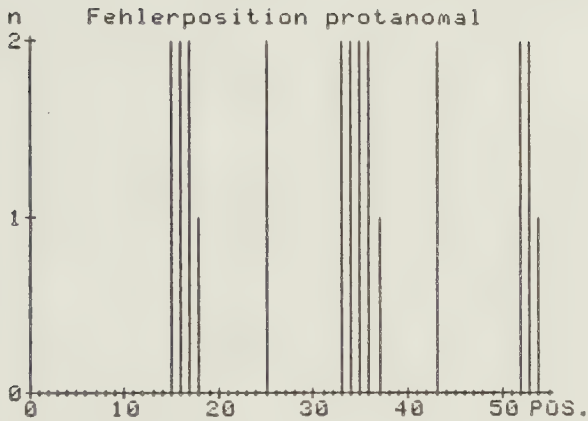


Abb. 4.2.2.7.: Fehlerpositionen der protanormalen Gruppe;
n: Anzahl der Probanden;
POS.: Position des Spektral-Modulators

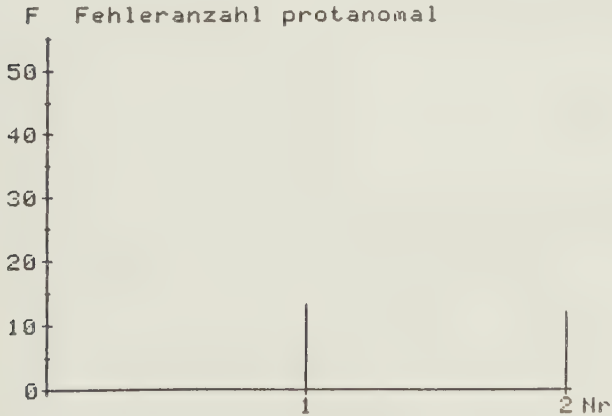


Abb. 4.2.2.8.: Fehleranzahl der protanormalen Gruppe;
F: Anzahl der Falschaussagen; Nr : Patientennummer

c) Deuteranope Versuchspersonen (n=11)

Wie aus Abb. 4.2.2.9. zu erkennen ist, lassen sich auch bei den Fehlerpositionen der deuteranopen Versuchspersonen Einzellinien und Bereiche maximaler Fehlerhäufigkeiten isolieren. Die Einzelpositionen 8 und 25 weisen hier jedoch eine Häufigkeit unter 50% aus (vergleiche dazu Abb. 4.2.2.1., protanop). Auch die Maxima der beiden Positionsbereiche 16-18 bzw. 32-36 erreichen nur ungefähr 55% bzw. 64% der Fehlermöglichkeiten. Im Positionsbereich 42-51 haben dagegen jeweils bis zu 9 der 11 Testpersonen einen von der Norm abweichenden Farbeindruck. Wie in Tab. 4.2.2.4. dargestellt, antwortet in diesem Bereich jeder Patient mindestens einmal falsch.

Versuchs- person	Position											mindestens 1
	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51		Fehler
1	x	-	x	x	-	x	x	x	x	x		x
2	x	-	x	x	x	x	x	-	-	-		x
3	-	x	x	x	x	x	-	-	-	-		x
4	x	x	-	-	-	-	-	-	x	x		x
5	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x
6	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-		x
7	x	x	-	x	-	-	-	x	x	x		x
8	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-		x
9	x	x	-	-	-	-	-	x	x	x		x
10	-	-	x	x	-	-	x	x	x	x		x
11	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x

Falschaussagende

Versuchspersonen

100%

Tab. 4.2.2.4.: Die Falschaussagen der Versuchspersonen an Einzelpositionen und bei einer kombinierten Bewertung mehrerer Positionen

In Abb. 4.2.2.10. sind die Fehleranzahlen der deuteranopen Testpersonen für alle 55 Testpositionen aufgetragen. Mit minimal 4 (7.3%) und maximal 26 (47.3%)

falschen Farbangaben pro Patient beim Test mit dem Spektral-Modulator schwanken die Werte erheblich. Dies wird auch aus einer Standardabweichung von ± 7.32 bei einem Mittelwert von 15.4 (28%) Fehlantworten ersichtlich. Die relative Standardabweichung bezogen auf den Mittelwert beträgt somit $\pm 47.5\%$.

Vergleicht man das Antwortverhalten der deuteranopen Patienten mit dem der protanopen, so erkennt man, daß die Häufigkeitsverteilungen beider Gruppen an verschiedenen Stellen liegen.

Die Abbildungen 4.2.2.11.-13. zeigen die Antwortspektren der Patienten für die Positionen 33, 45 und 51 des Spektral-Modulators. Es fällt auf, daß im Bereich der Positionen 45-51, an denen rötliche Farbtöne vorherrschen, von den Probanden eher "grün" empfunden wird. Bei der Position 33 ist das Verhalten gerade umgekehrt.

In Tab. 4.2.2.5 sind wieder die Antworten zu den Positionen 25 und 43 ("grau") aufgetragen, da diese auch bei der Gruppe der Deuteranopen zu einer hohen Fehlantwortrate führten.

Versuchs- person	Position 25	Position 43
1	rotgrün	grün
2	blau	dunkelgrün
3	-	grün
4	-	rotgrün
5	grünviolett	grün
6	-	-
7	rot	rot
8	purpur	blaurot
9	rot	rötlich
10	-	-
11	-	grün

Tab. 4.2.2.5.: Farbeindruck der deuteranopen Patienten an den Positionen 25 und 43
(-: "grau")

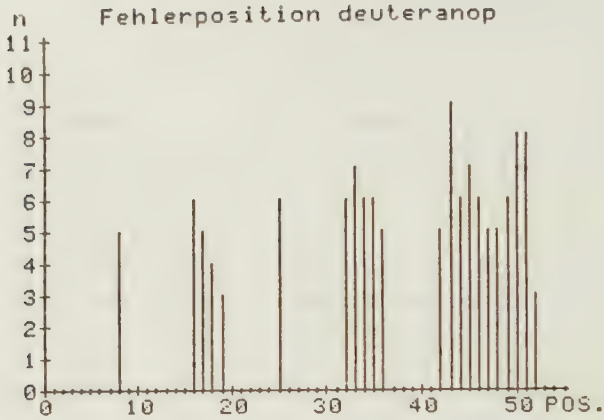


Abb. 4.2.2.9.: Fehlerpositionen der deuteranopen Gruppe;
n: Anzahl der Probanden;
POS.: Position des Spektral-Modulators



Abb. 4.2.2.10.: Fehleranzahl der deuteranopen Gruppe;
F: Anzahl der Falschaussagen; Nr : Patientennummer

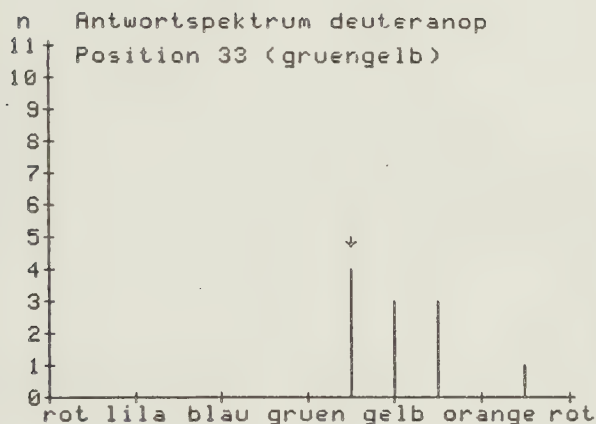


Abb. 4.2.2.11.: Antwortspektrum der deutanopen Gruppe an der Position 33 des Spektral-Modulators;
n: Anzahl der Probanden; Pfeil: Korrekte Farbangabe

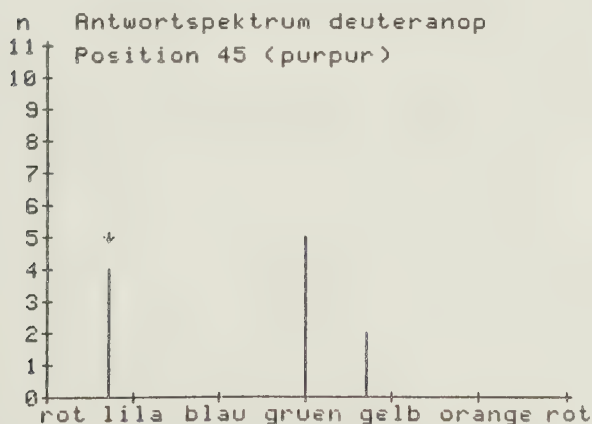


Abb. 4.2.2.12.: Antwortspektrum der deutanopen Gruppe an der Position 45 des Spektral-Modulators;
n: Anzahl der Probanden; Pfeil: Korrekte Farbangabe

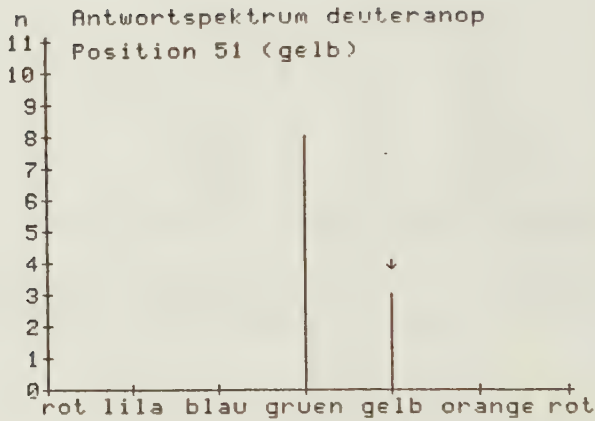


Abb. 4.2.2.13.: Antwortspektrum der deuteranopen Gruppe an der Position 51 des Spektral-Modulators;
n: Anzahl der Probanden; Pfeil: Korrekte Farbangabe

d) Deuteranomale Versuchspersonen (n=9)

Die Fehlerpositionen des deuteranomen Patientenkollektivs sind in Abb. 4.2.2.14. dargestellt. Als Einzellinien sind wieder die Positionen 25 und 43 auffällig. Ansonsten erscheinen die Positionsbereiche deutlich schmalbandiger als bei den (von der Stichprobenzahl vergleichbaren) Gruppen a) und c).

Die Fehleranzahl (Abb. 4.2.2.15.) der einzelnen deuteranomen Patienten ist mit im Mittel 11 (20%) Falschantworten (minimal 5 bzw. maximal 26) niedriger als die aller anderen Gruppen; die Standard-Abweichung beträgt ± 6.4 und liegt damit absolut zwischen den Werten der protanopen und der deuteranopen Gruppe. Auf den Mittelwert bezogen ist die Streuung jedoch mit $\pm 58.2\%$ am höchsten.

Die Antwortspektren an den für die deuteranomale Versuchsgruppe "relevanten" Positionen 34, 49 und 51 sind in den Abbildungen 4.2.2.16.-18. aufgetragen.

Interessant sind die eng benachbarten Positionen 49 und 51. Es fällt auf, daß bei gleicher Norm-Antwort ("gelb") die abweichenden Farbeindrücke der deuteranomen Patienten von rötlichen (Position 49) nach grünlichen Wahrnehmungen (Position 51) umschlagen.

In Tab. 4.2.2.6. sind die Antworten an den Positionen 25 und 43 ("grau") dargestellt. Es zeigt sich, daß an beiden Positionen überwiegend rötliche Farbeindrücke wahrgenommen werden. Verglichen mit den anderen untersuchten Gruppen streuen die Antworten der deuteranopen Probanden an den beiden "Grau"-Positionen weniger stark.

Versuchs- person	Position 25	Position 43
1	rötlich	rot
2	rot	rot
3	rot	rötlich
4	violett	hellviolett
5	orangegrün	orange
6	rötlich	rotgelb
7	rosa	rötlich
8	rot	rot
9	-	-

Tab. 4.2.2.6.: Farbeindruck der deuteranomalen Patienten an den Positionen 25 und 43
(- : "grau")

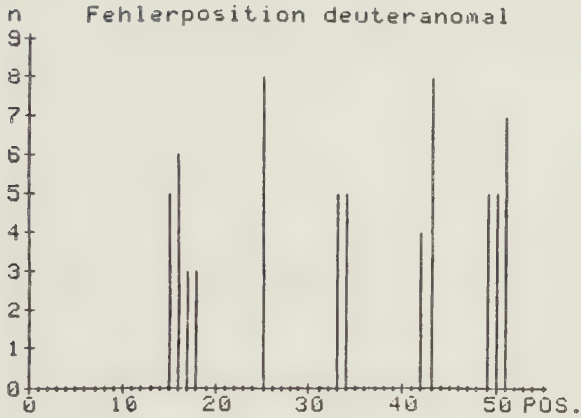


Abb. 4.2.2.14.: Fehlerpositionen der deuteranormalen Gruppe;
n: Anzahl der Probanden;
POS.: Position des Spektral-Modulators

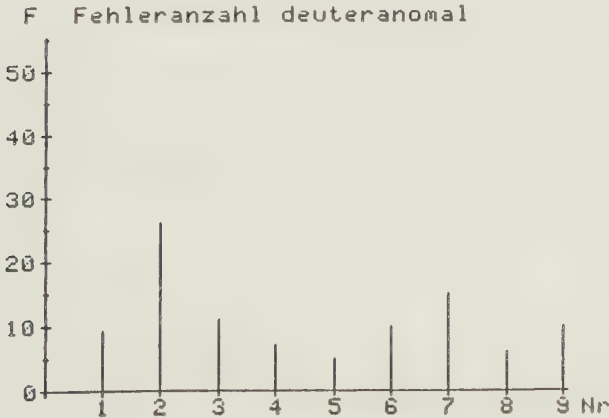


Abb. 4.2.2.15.: Fehleranzahl der deuteranormalen Gruppe;
F: Anzahl der Falschaussagen; Nr : Patientennummer



Abb. 4.2.2.16.: Antwortspektrum der deuteranomalen Gruppe an der Position 34 des Spektral-Modulators;
n: Anzahl der Probanden; Pfeil: Korrekte Farbangabe

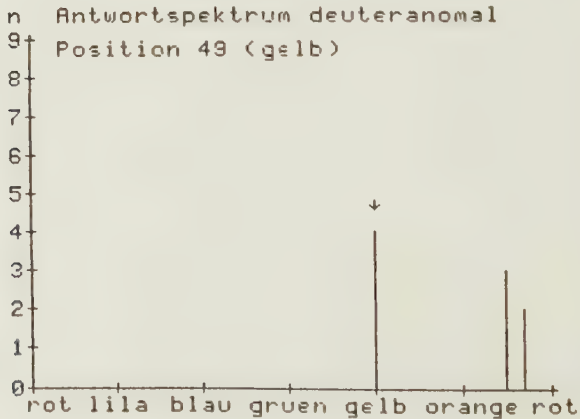


Abb. 4.2.2.17.: Antwortspektrum der deuteranomalen Gruppe an der Position 49 des Spektral-Modulators;
n: Anzahl der Probanden; Pfeil: Korrekte Farbangabe

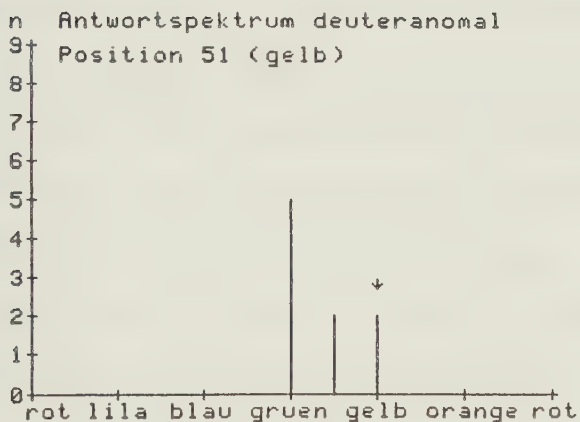


Abb. 4.2.2.18.: Antwortspektrum der deuteranormalen Gruppe
an der Position 51 des Spektral-Modulators;
n: Anzahl der Probanden; Pfeil: Korrekte Farbangabe

5.0. Diskussion

Vor der Wertung der vorliegenden Ergebnisse sei noch einmal auf die besondere Konfiguration des verwendeten Reizlichtes hingewiesen. Im Gegensatz zu den bisher verwendeten Farbtests handelt es sich bei dem in dieser Arbeit eingesetzten MSS-Stimulus um ein polychromatisches Testlicht, welches in seiner spektralen Zusammensetzung variabel ist. Dabei werden sowohl Farbton, Farbsättigung als auch Farbhelligkeit durch die Position der Sektorenscheibe modifiziert. Auf den Munsellschen Farbbaum übertragen bedeutet dies, daß man sich nicht nur in einer Ebene des Farbraumes bewegt, wie dies beim Anomaloskop in einer waagerechten Ebene für die Farb-Mischschraube und einer dazu senkrechten Linie für die Gelbschraube der Fall ist. Noch größer ist die Beschränkung im Farbraum beim Panel D-15 Test, bei dem man sich nur in einer Ebene bewegt (Farbhelligkeit=konstant) und hier zusätzlich Farborte wählt, die auf einem bestimmten Kreis um den Weißpunkt liegen (siehe Abb. 2.3.7.). Dagegen greift man mit dem Stimulus des Spektral-Modulators verschiedene Punkte des Farbraumes heraus. Durch Modifikation, die man an der Sektorenscheibe selbst vornimmt (z. B. teildurchlässige Sektorabdeckung oder andere Gestaltung der Abdeckmuster),

sowie Lageveränderung des verwendeten Verlauffilters bezüglich der Sektorenscheibe, könnte man weitestgehend beliebige Punkte des Farbraumes ansteuern.

Da durch den MSS-Test unterschiedliche Positionen des Farbraumes in allen drei Raumrichtungen gewählt werden, ist ein direkter Vergleich mit Ergebnissen der herkömmlichen Methoden, die sich auf ganz bestimmte Raumkoordinaten beschränken, nicht zulässig. Es können jedoch anhand der MSS-Ergebnisse charakteristische Eigenheiten und unterschiedliches Verhalten der untersuchten Gruppen festgestellt werden. Dies soll Gegenstand nachfolgender Ausführungen sein.

Die im Kapitel 4.2. dargestellten Ergebnisse lassen erkennen, daß die untersuchten kongenital farbsinngestörten Patienten bei dem in dieser Arbeit verwendeten polychromatischen MSS-Farbsinntest ein von farbtüchtigen Personen abweichendes Verhalten aufweisen. Diese Abweichungen treten jedoch nicht an allen Testpositionen der Sektorenscheibe in gleicher Stärke auf.

Ausgehend von den "Fehlerpositionen", die in den Abb. 4.2.2.1., 4.2.2.7., 4.2.2.9. und 4.2.2.14. für die jeweilige farbsinngestörte Testgruppe aufgetragen sind, kann man versuchen, die zur Farbsinn-Prüfung wirksamen und notwendigen Test-Positionen zu ermitteln. Dazu muß

noch einmal klargestellt werden, daß in den Abbildungen "Fehlerpositionen" nur diejenigen Werte eingetragen sind, bei denen mehr als 33% der jeweils getesteten Gruppe Falschangaben machte. Faßt man die Resultate der einzelnen Gruppen folglich so zusammen, daß für jede der untersuchten Farbsinnstörungen "wirksame" (Fehlerangabe über 33%) und "unwirksame" (Fehlerangabe unter 33%) Positionen unterschieden werden, ergibt sich das in Tab. 5.1. dargestellte Bild. Dabei sind die "wirksamen" Positionen durch ein "x" und die als "unwirksam" eingestuften durch ein "-" gekennzeichnet.

Wie sich aus Tab. 5.1. erkennen läßt, sind von den ca. 60 getesteten Positionen mit unterschiedlicher Testfarbe nur ungefähr 30 Stellungen der Sektorenscheibe relevant. Für spätere Untersuchungen ist dieses Resultat wichtig, weil es zeigt, daß die Test-Zeit gegenüber der bisherigen Dauer reduziert werden kann. Eine Reduktion auf ca. 50% ist jedoch nicht zu erwarten, da die subjektive Entscheidung über die Qualität der Farbe nicht an allen Testpositionen gleich schnell erfolgt. Es ist zu vermuten, daß es den farbschwachen Probanden vermehrt an den Positionen der Falschangaben schwerfällt, eine Aussage über die wahrgenommene Farbe zu treffen. Es dürfte daher eine realistische Einschätzung sein, daß

Position
n Gruppe

0-7 8 9-14 15-19 20-24 25 26-31 32-38 39-41 42 43 44-48 49 50-51 52-53-55

11 Protanop	-	x	-	x	-	x	-	x	-	-	x	-	x	-	x	x
2 Protanomal	-	-	-	x	-	x	-	x	-	-	x	-	-	-	x	x
11 Deutanop	-	x	-	x	-	x	-	x	-	-	x	x	x	x	x	-
9 Deuteranomal	-	-	-	x	-	x	-	x	-	-	x	x	-	x	x	-
Differenzierung Anop/Anomal	n	j	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
Differenzierung Protan/Deutan	n	n	n	n	n	n	n	n	n	j	n	n	n	j	n	j
wirksame Positionen zur Differenzierung Farbnormal/ Farbanomal; Summe: 28	0	1	0	5	0	1	0	7	0	1	1	5	1	2	1	3
wirksame Positionen zur Differenzierung verschied. Farbanomalien; Summe: 14	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	5	1	2	1	3
Auffindung nur der Protanopen	keine Diagnose durch nur einen Bereich möglich															
Auffindung nur der Protanomalien	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	j	n	n
Auffindung nur der Deutanopen	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	j	n	n	n
Auffindung nur der Deuteranomalien	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	j

Tab. 5.1.: Die Ergebnisse der MSS-Untersuchungen im Überblick (j=ja; n=nein)

sich die Test-Dauer auf ungefähr Dreiviertel der bisherigen Untersuchungszeit (also ca. 12-15 Minuten für die Mehrzahl der Patienten) verkürzen läßt, wenn man sich nur auf die Positionen beschränkt, an denen wenigstens eine der vier untersuchten farbfehlsichtigen Probanden-Gruppen eine Fehlerquote übr 33% aufweist. Eine weitere Verkürzung der Untersuchung ist denkbar, wenn man noch diejenigen Positionen unberücksichtigt läßt, an denen alle untersuchten Gruppen Falschangaben machen. Diese Positionen können ja nur die Farbfehlsichtigen von den Farbnormalen absondern. Dabei wird der Typ der Farbsinnstörung jedoch nicht erfaßt.

Die Tabelle 5.1. zeigt, daß in den Positionsbereichen 15-19, 25, 32-38 und 43 alle Farbsinnsgestörten fehlerhaft antworten. Ließe man diese 14 Positionen in Hinblick auf eine Klassifizierung der Farbfehlsichtigen unberücksichtigt, so käme man auf einen Testumfang von ca. 14 Testpunkten. Der Patient müßte folglich für diese psychophysikalische Untersuchung 14 Entscheidungen bzw. Bewertungen treffen. Damit wäre der Testaufwand auch von der Probandenbelastung her in etwa vergleichbar mit dem Panel D-15-Test, bei dem 15 Farbsteine in eine farbhähnliche Abfolge angeordnet werden müssen, oder mit den Ishihara-Test, bei dem 24 Tafeln zu bewerten sind. Auch bei einer Untersuchung mit dem Nagel-Anomaloskop

werden im Durchschnitt 10-20 Entscheidungen und Einstellungen vom Patienten verlangt; der Anomaloskop-Test ist deshalb aus dieser Sicht ebenfalls mit dem vorgeschlagenen reduzierten MSS-Test vergleichbar.

Bewertet man in Tab. 5.1. nun nur die übrigbleibenden Positionen, an denen die untersuchten Gruppen sich zum einen von den Normalfarbsichtigen, zum anderen aber auch untereinander unterscheiden, so fällt auf, daß es drei Positionen zur Differenzierung von Protan- und Deutan-Störungen gibt. Diese drei zur Differentialdiagnose interessanten Stellen sind die Einzelposition 42 und die Positionsbereiche 50-51 und 53-55. Dabei werden bei Position 42 und 50-51 nur von Deutan-Gruppen Falschangaben getroffen, bei dem Positionsbereich 53-55 dagegen nehmen nur Protan-Patienten vom Normaleindruck abweichende Farben wahr.

Ein weiterer interessanter Punkt ist die Position 8, die auf einen Unterschied zwischen anopen und anomalen Versuchspersonen hindeutet. Während die protanomalen und deuteranomalen Probanden hier fast ausschließlich den Farbeindruck des Farbnormalen haben, treten in der protanopen und deuteranopen Gruppe vermehrt Falschantworten auf.

Versucht man schließlich, nach den in Tab. 5.1. zusammengetragenen Befunden die vier in dieser Arbeit untersuchten Farbsinnstörungen differentialdiagnostisch einzeln zu erfassen, so fallen der Positionsbereich 44-48 und die Einzelpositionen 49 und 52 auf. Hier zeigen sich folgende typspezifische Unterschiede: Im Positionsbereich 44-48 bezeichnen nur deuteranope Versuchspersonen die angebotenen Farben falsch, während die anderen Gruppen sich in Tab. 5.1. als unauffällig repräsentieren. An der Position 49 dagegen treten in drei der vier untersuchten Gruppen fehlerhafte Angaben auf. Nur die protanomalien Patienten nehmen die Farbe so wahr, wie sie von normalfarbsichtigen Probanden beschrieben wird. Ein ähnliches Bild zeigt auch die Position 52. Hier ist es jedoch die deuteranomale Gruppe, die fast ausschließlich fehlerfrei den Farbeindruck bezeichnet, während in den übrigen in dieser Arbeit untersuchten Patientengruppen hierbei Falschangaben festzustellen sind.

Für die protanopen Versuchspersonen ist in Tab. 5.1. keine Position erkennbar, die diese Patienten eindeutig differenzieren und klassifizieren würde. Allerdings lassen sich verschiedene Vorschriften angeben, mit denen sich dieser Typ einer Farbsinnstörung erfassen ließe. Z. B. könnte nach den in Tab. 5.1. dargestellten Befunden zuerst der Positionsbereich 53-55 getestet werden, bei

dem sich die Protan-Störungen durch das Auftreten von Falschantworten manifestieren. Sodann könnten die Protanomalen und die Protanopen durch den Test mit Position 8 differenziert werden. Eine andere Möglichkeit wäre, einen protanopen Patienten zuerst durch seine Unauffälligkeit an den Positionen 42 und 44-48 bezüglich einer Deutan-Störung zu separieren und anschließend die Protanopie durch das Auftreten einer Falschangabe an Position 49 zu erkennen.

Bei der Bewertung der vorstehenden Ausführungen ist allerdings zu berücksichtigen, daß die in Tab. 5.1. eingetragenen Kreuze nur einen Prozentsatz an Falschangaben bezeichnen. Es ist folglich nicht zu erwarten, daß ein Test an nur einer oder zwei Positionen allein zu einer 100%-igen Sicherheit in der Klassifizierung der Farbsinnstörung führt. Betrachtet man z. B. die Position 49, die sich nach Tab. 5.1. zur Klassifizierung der Protanomalen anhand ihrer Unauffälligkeit eignet, so erkennt man aus den Abbildungen zu den Fehlerpositionen (Abb. 4.2.2.1., 4.2.2.7., 4.2.2.9. und 4.2.2.14.), daß zwar über 90% der protanopen Patienten an dieser Position Falschangaben machen, aber bei den Deutangruppen andererseits jeweils ca. 50% der untersuchten Probanden wie die Protanomalen den richtigen Farbeindruck beschreiben.

Auch im umgekehrten Fall, dem Positionsbereich 44-48, in dem nach Tab. 5.1. die deuteranope Gruppe im Gegensatz zu allen anderen Gruppen durch ihre Falschantworten auffällt, läßt eine genaue Analyse der Ergebnisse erkennen, daß dies im Durchschnitt nur bei ungefähr 55% der untersuchten Patienten der Fall war.

An letzterem Beispiel zeigt sich jedoch auch die Lösungsmöglichkeit für das Problem, daß die Patientenangaben uneinheitlich sind und in ihrer Fehlerquote schwanken. In Kapitel 4.2.2. wurde in der Tabelle 4.2.2.4. dargestellt, wie die Positionen 42-51 mit den Falschaussagen (aufgeschlüsselt nach den einzelnen Probanden) korreliert sind. Dabei ergibt sich, daß jede deuteranope Versuchsperson mindestens eine Falschaussage in diesem Positionsbereich macht. Die Sicherheit für zumindest eine Falschantwort der in der vorliegenden Arbeit untersuchten Deuteranopen beträgt somit 100%, wenn man die Mischfarben der Positionen 42 bis 51 dem Probanden anbietet. Bei einer Beschränkung auf den Positionsbereich 44-48, für den oben eine durchschnittliche Fehlerquote von ca. 55% der deuteranopen Probanden angegeben wurde, antworten immerhin noch ungefähr Dreiviertel dieser Versuchspersonen mit mindestens einer fehlerhaften Angabe, während in den anderen drei Patientenkollektiven

die meisten Personen den angebotenen Farbeindruck richtig bezeichnen konnten. Genauer zeigt die quantitative Auswertung der Testprotokolle für den Positionsbereich zwischen 44 und 48, daß bei einer Sicherheit von ca. 75% für mindestens eine Falschantwort der Deuteranopen nur eine der neun deuteranomalen Versuchspersonen in diesem Bereich falsch antwortete und somit im Verhalten eher der deuteranopen Gruppe zugeordnet werden müßte. Die protanopen und die protanomalen Probanden bezeichneten jeweils alle die Positionen 44-48 fehlerfrei!

Wie bei den Ergebnissen in Kap. 4.2.2. gezeigt wird, gibt es immer Positionsbereiche, die zusammengefaßt zu einer hohen Fehlersicherheit führen. Andererseits läßt sich aus Tab. 5.1. und bei einem direkten Vergleich der Abbildungen zu den Fehlerpositionen erkennen, daß die verschiedenen Untersuchungsgruppen jeweils eine unterscheidbare Fehler-Verteilung und Fehler-Häufigkeit an bestimmten Positionen des MSS-Testes aufweisen. Es sollte somit möglich sein, aufgrund der hier durchgeführten Voruntersuchungen Testvorschriften zu entwickeln, die mit großer Sicherheit zu einer eindeutigen und richtigen Diagnose bei einer potentiellen Protan- oder Deutan-Störung führen. Hinsichtlich einer Tritan-Störung konnten leider keine kongenital farbsinngestörten Probanden gefunden werden. Deshalb

mußte auf die Überprüfung dieses Farbsinndefektes mit dem MSS-Test im Rahmen der vorliegenden Arbeit verzichtet werden. Es ist jedoch zu vermuten, daß sich auch Tritan-Störungen durch einen (eventuell modifizierten) Test mit dem Spektral-Modulator differentialdiagnostisch überprüfen lassen. Man kann diese Vermutung auf zwei Tatsachen stützen: Zum einen wird, wie zum Beginn dieses Kapitels angesprochen, durch die mit der MSS-Apparatur erzeugten Testlichter ein weiter Bereich des Farbraumes ausgelotet, so daß mit großer Wahrscheinlichkeit auch Verwechslungsbereiche für Tritan-Störungen im Test angeboten werden. Spätestens nach einer Modifikation der Sektorenscheibe oder der Verlauffilter-Position, die weitere Bereiche des Farbraumes in den Test einbinden würde, sollte auch eine Erfassung der Tritanopie oder Tritanomalie möglich sein.

Weiterhin wurde bei den hier vorgestellten Untersuchungen zumindest eine Versuchsperson mit einer medikamentös erworbenen Blausinnstörung untersucht. Dabei ergaben sich im Vergleich mit den getesteten kongenitalen Protan- und Deutan-Probanden wesentlich drastischere und häufigere Falschangaben. Dieses Ergebnis wurde jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht vorgestellt, da hier nur kongenitale Farbsinnstörungen untersucht werden sollten. Dennoch soll das Resultat der MSS-Untersuchung einer

erworbenen Blausinn-Störung an dieser Stelle angesprochen werden, weil es als ein Indiz dafür gewertet werden kann, daß sich der MSS-Test auch erfolgreich zur Diagnostik von Tritanopien bzw. Tritanomalien einsetzen läßt.

Als Zusammenfassung der bisherigen Diskussion kann folgendes festgestellt werden:

Der MSS-Test zeigt typspezifische Unterschiede in den Antwortmustern der verschiedenen farbsinngestörten Probandengruppen. Es ist aufgrund der vorliegenden Daten denkbar, daß sich alle Farbsinnstörungen mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Prinzip einer Farbtest-Apparatur mit großer Sicherheit differentialdiagnostisch behandeln und erkennen lassen. Dazu müssen jedoch geeignete Testpositionen ausgewählt und Testvorschriften erarbeitet werden. Dies könnte aufgrund der hier zusammengetragenen Daten im Rahmen einer weiteren Arbeit erfolgen. Als ein Ergebnis der vorliegenden Arbeit wäre dabei zu berücksichtigen, daß es ausreichend ist, sich nur auf bestimmte Positionen und die dazugehörigen Testfarben zu beschränken. Die dadurch bedingte Verkürzung der Testzeit käme in erster Linie den Patienten zugute. Es muß jedoch wiederum betont werden, daß es aufgrund der vorerst nicht ausreichenden Daten (nur zwei protanomale Patienten; keine Probanden mit kongenitaler Tritan-Störung) noch zu früh ist, hier

vorgestellte Ergebnisse zu verallgemeinern oder als statistisch gesichert zu werten. Hierzu müssen erst die Ergebnisse aus weiteren Untersuchungen abgewartet werden. Insgesamt haben die hier durchgeführten Tests gezeigt, daß die einzelnen Probanden auch innerhalb einer Gruppe sehr inhomogen antworten. Dies zeigen die Abb. 4.2.2.2., 4.2.2.10. und 4.2.2.15. in denen die Fehleranzahlen nach den einzelnen Testpersonen aufgeschlüsselt sind. Außer der protanomalen "Gruppe", die nur aus zwei Testpersonen bestand, zeigen die anderen Gruppen eine doch nicht übersehbare Inhomogenität in ihren Fehleranzahlen. Bei Annahme einer Normalverteilung läßt sich die Streuung durch eine Standardabweichung, wie in Kap. 4.2.2. erfolgt, angeben. Diese Ergebnisse sind in Tab. 5.2. zusammengefaßt.

Versuchs- gruppe	mittlere Fehleranzahl	Standardabweichung	
		absolut	prozentual
Protanop	16.0	+/- 4.3	+/- 26.9
Protanomali	keine Auswertung durchgeführt		
Deutanop	15.4	+/- 7.3	+/- 47.5
Deutanomali	11.0	+/- 6.4	+/- 58.2

Tab. 5.2.: Mittlere Fehleranzahl und deren Standard-
abweichung der vier Versuchsgruppen

Man erkennt aus Tab. 5.2., daß mit einer Abnahme der mittleren absoluten Fehleranzahl gleichzeitig die relative Standardabweichung anwächst. So ist zwar die Unsicherheit bei der Farbbezeichnung im Mittel bei den deuteranomalen Patienten am geringsten, aber gleichzeitig verhalten sie sich in ihren individuellen Leistungen bezüglich der Farberkennung sehr unterschiedlich. Andererseits sind die protanopen Versuchspersonen in ihren Fehlerangaben relativ homogen, geben dafür aber im Mittel die höchste Zahl an Falschantworten bei den 55 Testpositionen.

In Kap. 4.1. wurde beschrieben, daß auch bei den durchgeführten klinischen Farbsinntests große Schwankungen in den Resultaten auftraten. Besonders beim PD 15-Test wurden sehr unterschiedliche Ergebnisse erzielt. Berücksichtigt man diesen Sachverhalt, so sind die Schwankungen in den MSS-Resultaten bei den einzelnen Patienten nicht verwunderlich. Eine mögliche Erklärung für die beobachteten Streuungen in den individuellen Leistungen wäre, daß die übliche Typklassifizierung der Farbsinnstörung zu grob und nicht ausreichend ist. Eventuell lassen sich noch einzelne Untergruppen einteilen, die für das unterschiedliche Verhalten der Probanden gleicher Farbfehlsichtigkeit verantwortlich

sind. Es ist jedoch auch zu berücksichtigen, daß ein subjektiver Test im allgemeinen zu großen individuellen Unterschieden in den Ergebnissen führt.

Die im Kapitel 4.2.2. dargestellten Antwortspektren lassen beim jetzigen Stand der Untersuchungen noch keine umfassenden Aussagen zu. Wie bei Protan- und Deutan-Störungen zu erwarten, treten hauptsächlich im grün-roten Farbbereich Verwechslungen auf. Die Darstellung der Antwortspektren dient in dieser Arbeit in erster Linie dazu, dem Leser einen Eindruck von der Qualität der Falschaussagen zu vermitteln, die in den anderen Abbildungen und Tabellen nicht zum Ausdruck kommt. Eine tiefergehende Diskussion dieser Ergebnisse wird hier jedoch nicht durchgeführt.

Abschließend soll festgehalten werden, daß zur genauen Interpretation der erhaltenen Ergebnisse und zur Festlegung bestimmter Vorgehensweisen mittels MSS-Test weitere umfangreiche Untersuchungen notwendig sind. Dazu ist es nötig, die zu untersuchenden Patientenkollektive zu erweitern und die Ergebnisse durch Wiederholung der Tests statistisch abzusichern. Erst wenn hierüber genaue Kenntnisse gewonnen worden sind, sollten sich Untersuchungen an Patienten mit erworbenen Farbsinnstörungen anschließen. Dabei wäre es klinisch von

hoher Bedeutung festzustellen, ob der Test mit dem Multiplexen Spektral-Stimulator verglichen mit den bisher zur Verfügung stehenden Farbtests eventuell ein empfindlicherer Indikator für bestimmte krankhafte Prozesse ist. Auch wird zukünftig der Vergleich der auf dem psychophysikalischen Weg mittels MSS-Test erhaltenen Ergebnisse mit den Untersuchungen zur objektiven Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit durch die Methode der Fourier-Interferometrischen Stimulation interessant werden.

6.0. Literatur

- 1) Adamczyk, R.: Measurement of spectral sensitivities of man by Fourier interferometric stimulation compared with other methods of determining spectral deficiencies, Wissensch. Ausstellung, 6th European Conference on Visual Perception, Lucca, 1983.
- 2) Adamczyk R., Gemperlein, R., Paul, R., Steiner, A.: Objektive elektrophysiologische Bestimmung der skotopischen und photopischen spektralen Empfindlichkeiten des menschlichen Auges mit Hilfe Fourierinterferometrischer Stimulation (FIS), Fortschr. Ophthalmol. 80, 1983, 488-491.
- 3) American Optical Company: Pseudo-isochromatic plates for testing color perception, Beck Engraving Co., Inc. Philadelphia, New York, 1940.
- 4) Barlow, H.B., Gemperlein, R., Paul, R., Steiner, A.: Human contrast sensitivity for comb-filtered spectra, Proceeding of the Physiological society, 1983.
- 5) Brockhaus ABC, Naturwissenschaft und Technik, VEB F.A. Brockhaus Verlag, Leipzig, 1968.
- 6) Farnsworth, D.: The Farnsworth-Munsell 100-hue and dichotomous test for colour vision. J. Opt. Soc. Am. 33, 1943, 568.

- 7) Farnsworth, D.: The Farnsworth dichotomous test for colour blindness, Panel D-15. Psychol. Corp., New York, 1947.
- 8) Gemperlein, R.: Fourier Interferometric Stimulation (FIS). A New Method for the Analysis of Spectral Processing in Visual Systems, MEDINFO 80, Proceedings of the Third World Conference on Medical Informatics, Tokyo, 1980, 372-376.
- 9) Gemperlein, R.: Fourier Interferometric Stimulation (FIS). A new method for the study of spectral characteristics in visual systems, Doc. Ophthalmol. Proc. Series, Vol. 33, 1982, 265-267.
- 10) Gemperlein, R.: The Determination of Spectral Sensitivities by Fourier Interferometric Stimulation (FIS). The Basic Principles and Advantages, Doc. Ophthalmol. Proc. Series, Vol. 31, 1982, 23-29.
- 11) Gemperlein, R., Adamczyk, R.: Bestimmung spektraler Empfindlichkeiten des visuellen Systems durch Fourier interferometrische Reizung (FIS), Automation und neuere Technologie in der Ophthalmologie, Lund, O.-E., Riedel, K. (Hrsgb.), Enke Verlag, Stuttgart, 1982.
- 12) Gemperlein R., Adamczyk, R., Paul, R., Steiner, A.: Die Vorteile Fourierinterferometrischer Stimulation (FIS) bei der Bestimmung spektraler Empfindlichkeiten des menschlichen Auges, Fortschr. Ophthalmol. Vol. 80, 1983, 492-495.

- 13) Grützner, P., Jäger, W.: Anleitung zur Untersuchung des Farbensinns. Entwicklung und Fortschritt in der Augenheilkunde, Enke Verlag, Stuttgart, 1963, 683.
- 14) Heinsius, E.: Farbsinnstörungen und ihre Prüfung in der Praxis, Enke Verlag, Stuttgart, 1973.
- 15) Hurvich, L. M.: Color Vision, Sinauer Associates Inc. (Publishers), Sunderland, Massachusetts, 1981.
- 16) Köllner, H.: Die Störungen des Farbensinns, Karger, Berlin, 1912.
- 17) Kries, J. von: Die Gesichtsempfindungen und ihre Analyse, Leipzig, 1882.
- 18) Nagel, W. A.: Zwei Apparate für die augenärztliche Funktionsprüfung. Adaptometer und kleines Spektralphotometer (Anomaloskop), Z. Augenheilk. 17, 1907, 201.
- 19) Paul, R.: Neue Aspekte der spektralen Empfindlichkeit von *Calliphora erythrocephala* gewonnen durch Fourierinterferometrische Stimulation (FIS), Dissertation an der Universität München, 1981.
- 20) Paul, R.: Fourier interferometric measurement of the scotopic and photopic spectral sensitivity of humans, Vortrag, 6th European Conference on Visual Perception, Lucca, 1983.

- 21) Schellenbeck, R.: Einführung in die Physiologie des Farbensinnes, Universitäts-Augenklinik Freiburg i.Br., Dr. Thilo Ophthalmologica (Hrsgb.), München, 1974.
- 22) Silbernagel, S., Despopoulos, A.: Taschenatlas der Physiologie, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1979.
- 23) Steiner, A.: Fourierinterferometrische Messung der spektralen Empfindlichkeit von zwei Schmetterlingsarten (*Pieris brassicae* und *Aglais urticae*), wissenschaftl. Ausstellung, Neurobiologentagung, Göttingen, 1982.
- 24) Steiner, A.: Die lineare und nichtlineare Analyse biologischer Sehsysteme mit einfachen Sinusreizen und Fourierinterferometrischer Stimulation (FIS), Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, 1984.
- 25) Steiner, A.: Die Analyse von Nichtlinearität und Phase des mit Fourier-interferometrischer Stimulation (FIS) ermittelten Elektroretinogramms, eingereicht zur Veröffentlichung in Fortschr. Ophthalmol., 1985.
- 26) Trendelenburg, W., Schütz, E.: Lehrbuch der Physiologie, Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1961.
- 27) Zrenner, E.: Neurophysiological aspects of color vision in primates. Studies of Brain Function, Vol. 9, Springer Verlag, New York, Heidelberg, 1983.

- 28) Zrenner, E.: A proposal for the documentation of clinically applied color vision tests, Dev. Ophthalmol. Vol. 9, 1984, 157.
- 29) Zrenner, E.: Farbsinnprüfungen: Grundlagen, Meßverfahren und Anwendungen bei angeborenen und erworbenen Farbsinnstörungen, in: Die Augenerkrankungen im Kindesalter, Hauptreferate der XX. Essener Fortbildung für Augenärzte, Lund, O.-E., Waubke, T. N. (Hrsgb.), Enke Verlag, Stuttgart, 1985, 263-286.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. O.-E. Lund für die Überlassung des Themas und die Möglichkeit, in der Augenklinik der Universität München die Untersuchungen durchführen zu können.

Sehr herzlich möchte ich den Herren Dr. Adamczyk und Dr. Steiner für ihren persönlichen Einsatz und die freundliche Beratung danken. Sie hatten großen Anteil beim Aufbau der Versuchsanordnung und bei der Durchführung der Messungen. Nicht zuletzt waren sie bei der Zusammenstellung der Arbeit behilflich.

Ferner möchte ich mich bei den Damen und Herren der Photoabteilung der Augenklinik bedanken.

Nicht zuletzt möchte ich mich noch bei den vielen Patienten bedanken, die sich für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt haben.

Lebenslauf

- 1918 Ich wurde als vierter Sohn des Brauereibesitzers Reinhold Pohl und seiner Ehefrau Alma, geb. Kretzschmar am 30. September 1918 in Breslau geboren. Nach 4 Jahren Grundschule, Aufnahme in die Oberrealschule am Nikolaitor in Breslau.
- 1935 Ich verließ die Anstalt mit dem Zeugnis der Obersekunda-Reife (Mittl. Reife) und begann die Lehre als Augenoptiker bei Dipl.-Optiker Schwarzer, Breslau.
- 1939 Reichsarbeitsdienst, Einmarsch in Polen.
- 1940 -
- 1945 Kriegsdienst in der deutschen Wehrmacht.
- 1946 Eröffnung eines Optiker-Fachgeschäftes in Eggenfelden, Niederbayern.
- 1948 Besuch der Fachhochschule für Augenoptik in Jena. Leitung Pro. Dr. Pistor. Abschluß als Augenoptikermeister.
- 1955 Beginn des Studiums der "Optometrie" in Chicago.
- 1958 Verleihung des akademischen Grades "Bachelor of Science" (Bakkalaureus der Naturwissenschaften) am 6. Juni 1958.
- 1959 1. Januar: Verleihung des akademischen Titels "Diplomate" nach erfolgreicher Ablegung des "National Board of Examiners" mit der License No. 416 (die Approbation als Optometrist).
- 1959 6. Juni: Promotion zum "Doctor of Optometry".
- 1959 -
- 1960 Berufsausübung als Optometrist in der Gemeinschaftspraxis Dr. Silge/ Dr. Pohl, 4001 Lincoln Ave, Chicago.
- 1960 Rückkehr nach Deutschland
- 1962 Eröffnung einer optometrischen Praxis in München, Rindermarkt 16, 1. Stock.
- 1973 Beginn des Medizinstudiums an der Ludwig-Maximilians-Universität München und Weiterführung der Praxis bis 15. Sept. 1982.

- 1976 März, Ärztliche Vorprüfung
1977 März, Ärztliche Prüfung, Teil I
1979 August, Ärztliche Prüfung, Teil II
1980 Oktober, Ärztliche Prüfung, Teil III , schriftl.
Abschnitt
- 1980 2. Dezember, Ärztliche Prüfung, Teil III, mündl.
Abschnitt
- 1983 19. Sept.: Erteilung der Ärztlichen Approbation
Neueinrichtung einer optometrischen Praxis in Pfarr-
kirchen, Ringstr. 17, 2. Stock.

